



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VÝPOČET ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍHO POLE
V ELEKTRICKÉM STROJI

CALCULATING THE TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION IN AN ELECTRICAL
MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Haratek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jiří Haratek

ID: 148952

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s termikou elektrických strojů
2. Vytvořte model elektrického stroje
3. Proveďte výpočty oteplení tohoto stroje pomocí MKP a pomocí teplených sítí
4. Výsledky výpočtů vyhodnoťte a porovnejte s naměřenými hodnotami

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] STŘEDA, Ivo. Termodynamika: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 149 s. ISBN 80-010-0452-X.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o způsobech sloužících ke zjištění rozložení teplotního pole v elektrickém stroji. Teoretická část se věnuje metodám měření teploty ale také vzniku a přenosu tepelné energie v elektrickém stroji, konkrétně asynchronním motoru. Vedle klasických metod výpočtu oteplení se práce zabývá tepelnou analýzou motoru použitím metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench. V závěru práce je rozvedena vhodnost použití jednotlivých metod v porovnání s měřením oteplovací zkoušky reálného asynchronního motoru.

Klíčová slova

Měření teploty, Oteplovací zkouška, Asynchronní motor, Metoda konečných prvků, ANSYS Workbench, Výpočet tepelných sítí, Teplotní pole, Ztráty elektrického stroje

Abstract

This diploma thesis deals with methods used to determine the temperature field distribution within an electric machine. The first part is focused on methods of temperature measurement, generation and transfer of the thermal energy within the electric machine, asynchronous motor in particular. The thesis describes classical methods of temperature measurement and it also deals with ANSYS Workbench finite element method for thermal analysis of the motor. The final part of the thesis is focused on a comparison of all discussed methods with respect to results of thermal test for real asynchronous motor and concludes the most proper method.

Keywords

Temperature Measurement, Heat Examination, Asynchronous Motor, Finite Element Method, ANSYS Workbench, Calculation of Thermal networks, Temperature Fields, Losses of Electrical Machine

Bibliografická citace:

HARATEK, J. Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc ale především za projevenou empatii a solidárnost v krušných chvílích při zpracování mé diplomové práce. Velké díky také patří celému IAESTE LC Brno za poskytnutí kanceláře při tvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině a všem těm, kdo mne po celou dobu studia podporovali.

V Brně dne **24. května 2017**

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	1
2. Teplo a teplota	2
2.1 Teplotní stupnice	3
2.2 Teplotní vlastnosti materiálů	4
3. Přenos tepla	7
3.1 Přenos tepla vedením	7
3.2 Přenos tepla prouděním	7
3.3 Přenos tepla zářením	8
4. měření teploty	9
4.1 Kontaktní měření teploty	9
4.1.1 Odporové senzory teploty	10
4.1.2 Termoelektrické články	12
4.1.3 Dilatační teploměry	12
4.1.4 Speciální senzory	13
4.2 Bezkontaktní měření teploty	13
4.2.1 Pyrometry	14
4.2.2 Termovize	15
5. Elektrické stroje	17
5.1 Asynchronní motor	17
5.1.1 Princip činnosti	18
5.2 ztráty a účinnost elektrického stroje	19
5.3 Měření ztrát v elektrických strojích	21
5.3.1 Měření ztrát naprázdno	21
5.3.2 Měření ztrát nakrátko	23
6. Chlazení elektrických strojů	25
6.1 Stroje s přirozeným chlazením	25
6.2 Stroje s vlastním chlazením	25
6.3 Stroje s cizím chlazením	25
6.4 Chlazení otevřených strojů	26
6.5 Chlazení zavřených strojů	26
7. Tepelný výpočet elektrických strojů	27
7.1 Ohřívání homogenního tělesa	29
7.2 Výpočet ustáleného oteplení	30
7.3 Výpočet pomocí náhradních tepelných obvodů	30
8. Měření asynchronního motoru	38
8.1 Podmínky pro oteplovací zkoušky	38
8.2 Provedení oteplovací zkoušky naprázdno	39

8.3	Provedení oteplovací zkoušky při jmenovitém zatížení.....	42
9.	tvorba modelu asynchronního motoru	44
9.1	Autodesk Inventor.....	44
9.2	Tepelná analýza motoru metodou konečných prvků	44
9.3	Numerický výpočet oteplení asynchronního motoru.....	48
10.	zhodnocení a porovnání výsledků.....	54
11.	Závěr	58
	Literatura	60
	Seznam symbolů a zkratk.....	62

Seznam obrázků

Obr. 3.1 - Typy přenosu tepla [23]	8
Obr. 4.1 - Odporové senzory teploty [24]	11
Obr. 4.2 - Princip zapojení termoelektrického článku [1]	12
Obr. 4.3 – Pyrometr [20].....	15
Obr. 4.4 – Termokamera [21]	16
Obr. 4.5 - Snímek elektrického stroje termokamerou	16
Obr. 5.1 - Řez asynchronním motorem [5].....	18
Obr. 5.2 - Asynchronní motor [22]	19
Obr. 5.3 - Tok výkonu v asynchronním motoru [6]	21
Obr. 5.4 - Rozdělení ztrát mechanických a ztrát v železe [18].....	22
Obr. 7.1 - Křivka ochlazování [3].....	30
Obr. 7.2 - Křivka ohřevu [3]	30
Obr. 7.3 - náhradní tepelný obvod statoru elektrického motoru [3]	32
Obr. 7.4 - úplné náhradní schéma asynchronního motoru [3]	35
Obr. 7.5 - Oteplovací charakteristika.....	37
Obr. 8.1 - Štítkové hodnoty měřeného stroje	38
Obr. 8.2 - Určení měřicích míst na motoru	39
Obr. 8.3 - Oteplovací charakteristika naprázdno.....	40
Obr. 8.4 - Porovnání hodnot naměřených termokamerou, termočlánkem a pyrometrem	41
Obr. 8.5 - Fotografie termokamerou při zkoušce naprázdno.....	42
Obr. 8.6 - Odečítání teploty z termokamery	42
Obr. 8.7 - Oteplovací charakteristika při zatížení	43
Obr. 9.1 - Řez modelem.....	44
Obr. 9.2 - Model asynchronního motoru	44
Obr. 9.3 - Nastavení sítě MKP	45
Obr. 9.4 - Teplotní simulace motoru	46
Obr. 9.5 - Zobrazení tepelného toku motorem	46
Obr. 9.6 - nastavení simulace s chlazením.....	47
Obr. 9.7 - teplotní simulace s chlazením.....	47
Obr. 9.8 - Proudění tepla uzavřeným motorem [15]	48
Obr. 9.9 - Náhradní schéma tepelného obvodu motoru [15]	49
Obr. 9.10 - Grafické zjištění časové konstanty	53
Obr. 9.11 - porovnání hodnot naměřených a vypočtených.....	53
Obr. 10.1 - Porovnání oteplovací charakteristiky.....	54
Obr. 10.2 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot povrchové teploty	56

Seznam tabulek

Tab. 2.1 - Tabulka ekvivalentních veličin v tepelně elektrické analogii [17]	6
Tab. 7.1 - Velikosti součinitele tepelné vodivosti u různých materiálů [3]	29
Tab. 8.1 - Hodnoty ustáleného oteplení naprázdno.....	40
Tab. 8.2 - Hodnoty ustáleného oteplení se zatížením	43
Tab. 10.1 - Výsledky měření oteplení motoru.....	54
Tab. 10.2 – Výsledky vnitřního oteplení numerickým výpočtem.....	55
Tab. 10.3 - Tabulka naměřených a vypočtených hodnot povrchové teploty	55
Tab. 10.4 - Výsledky oteplení pomocí MKP	57
Tab. 10.5 - Přehled všech výsledků při zatížení 5 Nm	57

1. ÚVOD

V dnešní době se objevuje stále více variací využití elektrických strojů ať už v průmyslu či v každodenním životě. Požadavky na tyto stroje jsou stále větší, a proto je vyvíjen tlak na vývoj v oblasti bezpečnosti a oteplení. V točivých elektrických strojích vznikají ztráty ať už mechanické, elektromagnetické či ztráty Joulovy ve vodičích elektrického proudu. Všechny tyto ztráty přispívají k zahřívání elektrického stroje.

Teoretický úvod práce je zaměřen na seznámení se základy tepla a teploty, ale také se základy termodynamiky a různými způsoby měření teploty ať už kontaktními či bezkontaktními teploměry. Dále se v teoretické části práce obrací na problematiku vzniku tepelných ztrát v elektrickém stroji a celkově na princip funkce asynchronního motoru.

Tato práce se zabývá výpočtem rozložení teplotního pole v elektrickém stroji. Jako testovaný stroj byl zvolen asynchronní motor o výkonu 750 W. Model tohoto motoru navržený v programu Autodesk Inventor představoval prostředek k vytvoření tepelné analýzy pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench. Tato analýza probíhala na základě hodnot naměřených při laboratorním měření oteplení daného asynchronního motoru. Dále byla použita metoda jednoduchého numerického výpočtu oteplení asynchronního stroje. Pro zjednodušení výpočtů i analytického modelu byl uvažován uzavřený stroj s přirozeným chlazením, kde je všechen ztrátový výkon odveden do okolního, chladicího vzduchu pomocí žebrování kostry a předním a zadním štítem motoru.

Všechny získané výsledky výpočtů, analýzy a měření jsou v poslední kapitole práce zhodnoceny a porovnány. V závěru je pak vyhodnocení přínosu celé práce pro návrh a konstrukci moderních malých asynchronních motorů a jejich závislosti oteplení na ztrátách vytvořených vlastním provozem stroje.

2. TEPLA A TEPLOTA

Mezi teplem a teplotou je velký rozdíl. Teplota je fyzikální veličina, se svou fyzikální jednotkou. Tato veličina popisuje stav určité soustavy. Teplo je fyzikální veličina a druh energie, která se vztahuje k nějakému ději, např. tepelné sálání.

Teplota je stavová veličina, která určuje stav termodynamické rovnováhy. To znamená, že těleso je v soustavě izolované od okolního prostředí, které nezpůsobuje žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny v soustavě nezávisí na čase. Tento stav termodynamické rovnováhy je popsán termodynamickou teplotou. Termodynamická teplota musí být stejná pro všechny uzavřené soustavy.

Fyzikální veličina teplo se nikdy nemůže ztotožňovat s fyzikální veličinou teplota. Teplo je druh energie popisující pohyb částic v uzavřené soustavě a závisí na minulosti vývoje v této soustavě. Na druhou stranu teplota je stavovou veličinou a závisí na přítomném stavu soustavy. [1]

Teplo:

Značka: Q

Jednotky: J (Joule)

Popisuje termodynamickou změnu stavu soustavy, nikoliv však samotný stav. Představuje část energie, kterou soustava odevzdá nebo přijme od jiné soustavy, přičemž se koná práce. Tento jev se nazývá tepelná výměna. Množství tepla přijatého nebo odevzdaného homogenním systémem za změny teploty je popsán vztahem (2.1) [1]

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [J] \quad (2.1)$$

Kde:

m – hmotnost soustavy [kg]

c – měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹]

ΔT – rozdíl teplot ($\Delta T = T_2 - T_1$) [K]

Teplota:

Značka: T

Jednotky: K (Kelvin)

Teplo je stavová veličina, která charakterizuje stav látky. Pokud jsou ve vzájemném styku neizolované termodynamické soustavy v tepelné rovnováze, mají také stejnou teplotu. Tento fakt se nazývá nultým zákonem termodynamiky. [1]

2.1 Teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice:

Symbol: T

Jednotka: K (Kelvin)

Tato teplotní stupnice je definovaná na principu určování účinnosti Carnotova cyklu. Účinnost Carnotova cyklu pracujícího mezi dvěma shodnými teplotami je závislá jen na těchto teplotách. Není závislá na jiných vnitřních ani vnějších parametrech. Pro tepelný Carnotův cyklus však nemůžeme nikdy dosáhnout účinnosti 100%. Účinnost libovolného nevratného cyklu nemůže být větší než účinnosti vratného Carnotova cyklu, pokud oba cykly pracují se stejnou teplotou. [1]

Kelvin, jednotka termodynamické teploty, je definována jako 273,16 část teploty trojného bodu vody. Pro $T_2 > T_1$ tedy platí:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad [-] \quad (2.2)$$

Ze vztahu tedy vyplývá, že:

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.3)$$

Kde: η – Účinnost cyklu [-]
T – Termodynamická teplota [K]
 Q_2 – Teplo odebrané z lázně o teplotě T_2 [J]
 Q_1 – Teplo odevzdané do lázně o teplotě T_1 [J]

Celsiova teplotní stupnice:

Symbol: ϑ

Jednotka: °C (Stupeň celsia)

Tato teplotní stupnice je odvozena od termodynamické teplotní stupnice posunutím o hodnotu 273,15 K. Tato hodnota je o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Na této stupnici jsou dány dvě hodnoty, které jsou stěžejní pro Celsiovu stupnici. Těmito body je 0°C, což je bod tání ledu a 100°C, což je bod varu vody. [1]

$$\vartheta (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K} \quad (2.4)$$

Pro tento teplotní rozdíl také platí:

$$\Delta\vartheta = \Delta T \quad (2.5)$$

Fahrenheitova teplotní stupnice:

Symbol: ϑ_F

Jednotka: °F (Stupeň Fahrenheita)

Tato teplotní stupnice se používá pouze v některých státech, převážně však v USA. Teplota pro bod tání ledu je 32°F a pro bod varu vody 212°C. Pro převod teploty na Fahrenheitovu stupnici platí vztah: [1]

$$\vartheta_F (^\circ\text{F}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}\vartheta - 32 \quad (2.6)$$

2.2 Teplotní vlastnosti materiálů

Měrná tepelná kapacita:

Symbol: c

Jednotka: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita je také někdy označována jako specifické teplo či měrné teplo. Tato veličina udává množství tepla, které je zapotřebí k ohřátí látky o jeden stupeň celsia nebo kelvina o hmotnosti jednoho kilogramu. Měrná tepelná kapacita je teplotně závislá, tudíž je zapotřebí u výpočtů určit i látku a její teplotu. [9]

Tepelná vodivost:

Symbol: λ

Jednotka: $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tepelná vodivost udává schopnost materiálu vést teplo, tedy rychlost šíření tepla ze zahřáté části látky do chladnější části látky. Součinitel tepelné vodivosti je materiálová konstanta, která určuje celkovou tepelnou vodivost. Je definována jako množství tepla, jež musí projít tělesem za jednotku času, aby nastal jednotkový teplotní spád na jednotkovou délku. [9]

Emisivita:

Symbol: ε

Jednotka: -

Emisivita je hodnota, která popisuje poměr energie, jež vyzařuje daný objekt a ideální černé těleso při stejné teplotě. Hodnota emisivity se pohybuje v rozsahu 0,0 až 1,0, přičemž hodnota 1,0 představuje hodnotu ideálního objektu (černého tělesa). Některé infračervené teploměry mají možnost nastavení emisivity, pro přesné naměření teploty. Obtížně se potom měří objekty s velmi nízkou emisivitou (pod 0,2), protože u některých leštěných nebo lesklých kovových povrchů, je díky jejich odrazivosti velmi obtížné měření přesné teploty. [9]

Délková roztažnost:

Symbol: α_r

Jednotka: K^{-1}

Tento jev popisuje změnu rozměrů tělesa, při změně jeho teploty. Délková teplotní roztažnost je reakcí na zvětšování středních vzdáleností mezi částicemi tělesa vlivem většího neuspořádaného pohybu. Hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti závisí na druhu materiálu a udává o kolik se tyč dlouhá 1 m prodlouží, zvýšíme-li teplotu o 1 K. [9]

Vztah pro prodloužení délky tyče můžeme uvést v tomto tvaru:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

Kde: Δl – změna délky tyče po změně teploty [m]
 l_0 – počáteční délka tyče při referenční teplotě T_0 [m]
 ΔT – rozdíl teplot tyče [K]

Objemová roztažnost:

Symbol: β_r

Jednotka: K^{-1}

Objemová roztažnost je fyzikální jev, který udává změnu objemu tělesa, při změně jeho teploty. Tato vlastnost těles nastává v reakci na změnu teploty a teplotní délkovou roztažnost ve všech směrech stejně velikou. Velikost objemové roztažnosti popisuje součinitel objemové teplotní roztažnosti. [9]

Vztah pro výpočet změny objemu tělesa při změně teploty:

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (2.8)$$

Kde: V – objem tělesa po změně teploty $[m^3]$
 V_0 – počáteční objem tělesa při referenční teplotě T_0 $[m^3]$
 ΔT – rozdíl teplot tyče $[K]$

Tab. 2.1 - Tabulka ekvivalentních veličin v tepelně elektrické analogii [17]

Tepelný systém		Elektrický systém	
teplota	$T [K], \vartheta [^{\circ}C]$	potenciál	$U [V]$
teplotní rozdíl	$\Delta T = T_2 - T_1 [K]$	elektrické napětí	$U = U_2 - U_1 [V]$
tepelné množství	$Q_t [J]$ $Q_t = \Phi \cdot T [J, W, s]$	elektrické množství	$Q_e [C]$ $Q_e = I \cdot t [C, A, s]$
tepelný tok	$\Phi = Q_t / t [W, J, s]$	elektrický proud	$I = Q/t [A, C, s]$
tepelný odpor	$R_t = T / \Phi [K/W, K, W]$	elektrický odpor	$R = U/I [\Omega, V, A]$
tepelná kapacita	$C_t = Q_t / T [J/K, J, K]$	elektrická kapacita	$C = Q/U [F, C, V]$

3. PŘENOS TEPLA

V různých podmínkách může probíhat přenos energie za pomoci různých nosičů. U pevných těles probíhá přenos energie pomocí nosičů výměnou energií a vzájemným působením s látkovými částicemi tělesa. Pokud probíhá přenos energie za podmínek blízkých termodynamické rovnováhy v každém místě tělesa, můžeme říct, že probíhá přenos energie či také sdílení tepla vedením (kondukcí).

Včetně přenosu tepla vedením dochází v pohyblivých prostředích k přenosu energie pomocí přemísťování hmotnosti prostředí. Tento způsob přenosu tepla se nazývá sdílení tepla prouděním (konvekci).

Energie může být také přenášena zářením (radiací), tedy působením nosičů energie s částicemi prostředí. K tomu dochází při sálání, tedy při emisi neutronů, elektronů nebo fotonů.

Všechny tři typy přenosu energie se většinou vyskytují současně nebo v různých kombinacích. Pokud máme například povrch elektrického stroje, vyskytuje se zde přenos tepla vedením (kondukcí) a sáláním (radiací) do okolního prostředí. [2]

3.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením vzniká v objektu s nerovnoměrně rozloženou teplotou ve svém objemu. Teorii přenosu tepla vedením popisuje Fourierův zákon:

$$\Phi = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad } T \quad (3.1)$$

Kde:	T – teplota	[K]
	Φ – tepelný tok	[W]
	A – plocha	[m ²]
	λ – součinitel tepelné vodivosti	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]

3.2 Přenos tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním obsahuje vždy i přenos tepla vedením. Přenos tepla vedením (molekulární transport) a prouděním (molární transport) představuje transport energie, který je složen v různých poměrech, jež závisí na termodynamických a termokinetických veličinách dané tekutiny nebo plynu.

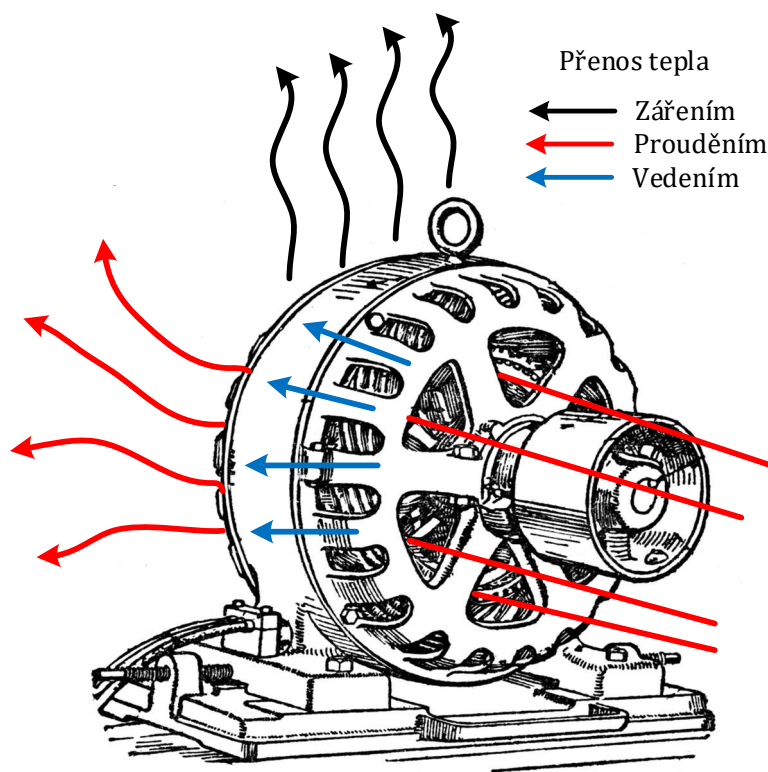
Pokud je proudění uměle způsobováno například působením čerpadla nebo ventilátoru, jedná se o proudění vynucené. Vznikne-li však samovolně, jedná se o proudění volné. [2]

3.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením přenáší teplo z tělesa do prostředí pomocí elektromagnetického záření. Těleso nemusí tepelné záření jen vysílat (emitovat), ale může jej také pohlcovat (absorbovat). Schopnost tělesa emitovat nebo absorbovat teplo závisí na jeho hmotnosti. Každé těleso či látka záření částečně odráží, propouští a pohlcuje. V tom případě platí vztah:

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_{tr} + \Phi_a \quad (3.2)$$

Energie, kterou látka pohltí, se v ní přeměňuje hlavně na tepelnou energii. Poměr energie, kterou látka pohltí k celkové energii dopadající se nazývá pohltivost (Φ_a). Poměr energie odražené k celkové energii dopadající je odrazivost (Φ_r) a poměr energie propuštěné se nazývá propustnost (Φ_{tr}). [2]



Obr. 3.1 - Typy přenosu tepla [23]

4. MĚŘENÍ TEPLOTY

V této kapitole se seznámíme se základními metodami a principy na kterých fungují teploměry a sondy sloužící pro měření teplot. Jako základní způsoby jsou kontaktní a bezkontaktní měření teploty. Oba způsoby se v praxi využívají pro sestavení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrických strojů.

4.1 Kontaktní měření teploty

Kontaktní měření teploty spočívá v bezprostředním kontaktu měřicí sondy s měřeným zařízením, kde probíhá přímý přenos tepla z měřeného povrchu na sondu. Existuje plno typů a způsobů, jak jsou měřicí sondy realizovány. Měřicí sondy používané při měření teploty u elektrických strojů lze rozdělit pod provedení do několika základních skupin:

- Odporové senzory
- Termoelektrické senzory
- Indikátory teploty

U kontaktního měření nastává také otázka uchycení měřicího senzoru na měřený povrch. Při užití speciálních lepidel může dojít po odebrání čidla k jeho poškození. Právě termočlánky jsou dosti náchylné na mechanické působení vzhledem k jejich funkčnosti. Tento případ mechanického poškození nastává většinou při krátkodobých měřeních, kdy čidla přemísťujeme. Při uchycení měřicích čidel, bychom měli také dávat pozor na to, aby nevznikaly nepřesnosti v měřené teplotě například z důvodů vytvoření oblastí s jinou teplotou než měřený objekt. [4]

Výhody kontaktního měření:

- Nízká cena
- Snadné umístění na požadované místo na stroji
- Vysoká rychlost odezvy

Nevýhody kontaktního měření:

- Nutnost připojovacích vodičů
- Na pohyblivých částech stroje je komplikované měření
- Občasná nutnost zasáhnout do konstrukce – vrtání otvorů, ...

4.1.1 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty mohou být kovové nebo polovodičové.

Kovové odporové senzory teploty:

U kovových čidel teploty je principem závislost odporu kovu na teplotě. Jednou ze základních materiálových konstant je teplotní součinitel odporu α_o (K^{-1}), který je vyjádřen následující rovnicí. [1]

$$\alpha_o = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial(\ln R)}{\partial t} = - \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial t} \quad (4.1)$$

Kde je:

α_o	– Teplotní součinitel odporu	[K^{-1}]
R	– Elektrický odpor	[Ω]
σ	– Konduktivita	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]

Pro malé teploty od 0 °C do 100 °C lze s určitou nejistotou používat lineární vztah

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_o t) \quad (4.2)$$

Kde R_0 je odpor čidla za teploty 0 °C. Pak lze jednoduše stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α_o .

$$\alpha_o = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (4.3)$$

Kde R_{100} je odpor za teploty 100 °C.

Dalším velice důležitým parametrem odporových senzorů je poměr odporů senzoru při teplotě 100 °C a 0 °C. Poměr odporů se označuje písmenem W a počítá se dle vztahu 4.4.

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (4.4)$$

Podle použitých materiálu při výrobě senzoru, lze kovové odporové senzory teploty rozdělit do těchto skupin:

- Odporové platinové snímače teploty
- Odporové niklové snímače teploty
- Odporové měděné snímače teploty

Polovodičové odporové senzory teploty:

Polovodičové senzory teploty využívají stejně jako kovové senzory teplotní závislost odporu. U polovodičových senzorů je hlavním parametrem změny teplotního součinitele odporu α_o závislost koncentrace nosičů náboje n . [1]

$$\alpha_o \approx \frac{\partial(\ln n)}{\partial T} \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

Teplotní součinitel odporu α_o má zápornou hodnotu. Termistory jsou založeny na změně odporu v polovodiči. Zde odpor nelineárně klesá s rostoucí teplotou. Polovodičové odporové senzory teploty lze podle provedení rozdělit na:

- Termistory
- Negastory
- Pozistory
- Monokrystalické Si senzory
- SiC senzory
- Diodové PN senzory
- Tranzistorové PN senzory



Obr. 4.1 - Odporové senzory teploty [24]

4.1.2 Termoelektrické články

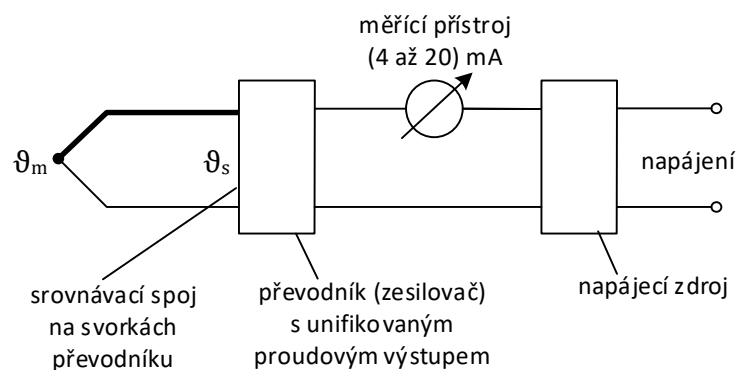
Využívá se zde termoelektrického jevu, kdy na styku dvou různých kovových pásků vzniká rozdíl potenciálů v důsledku rozdílné výstupní teploty. Termoelektrické napětí je přímo úměrné rozdílu teplot styku dvou kovů:

$$E = a + b\Delta\vartheta + c(\Delta\vartheta)^2 \quad (4.6)$$

Kde a , b , c jsou empirické konstanty pro daný senzor a $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot obou kovů.

Termoelektrické články pracují na principu Seebeckova jevu, tedy na převodu tepelné energie na elektrickou. Tento jev vzniká tak, že části vodiče s větší teplotou mají nositele náboje s větší energií, proto difundují do části s menší teplotou lépe a ve větším množství, než z chladnější části do teplejší. Tak vzniká rozdíl potenciálu a jednostranná převaha kladných nebo záporných nábojů. Pomocí tohoto jevu, můžeme přímo převést teplotu na elektrické napětí.

Jednotlivé dvojice materiálů pro výrobu termoelektrických článků jsou normalizovány a byly vybrány na základě přijatelné nelinearity měření pro daný teplotní rozsah a velikost dosažitelného termoelektrického napětí $E = f(\Delta t)$. Dále také u termoelektrických článků sledujeme odolnost proti chemickým vlivům, korozi, ionizačnímu záření, atd. [1]



Obr. 4.2 - Princip zapojení termoelektrického článku [1]

4.1.3 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry pracují na principu teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů. Dle konstrukce se dělí na:

- Tyčové
- Bimetalické
- Bimateriálové
- Skleněné
- Kapalinové tlakové

- Parní tlakové
- Plynové tlakové

Vzhledem ke svým rozměrům a měřicí přesnosti, nejsou úplně nejvhodnější měřicím nástrojem pro měření teploty na elektrických strojích. [1]

4.1.4 Speciální senzory

Akustické teploměry:

Akustické teploměry jsou založeny na teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v plynném nebo pevném prostředí.

Krystalové teploměry:

Krystalové teploměry využívají své teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného krystalu. Teplotní součinitel frekvence oscilátoru α_f a daná referenční frekvence, kterou budíme krystal mají za následek citlivost teploměru řádově 1 kHz/K. Tyto teploměry jsou velmi přesné s rozlišovací schopností až 10^{-4} °C.

Magnetické teploměry:

Magnetické teploměry jsou založeny na teplotní závislosti magnetické susceptibility κ paramagnetických solí. (např. dusičnan hořečnatý, síran amonný manganatý atd.)

Magnetická susceptibilita závisí na permeabilitě materiálu. Ta se vyhodnocuje v tomto případě změřením indukčnosti vzduchové cívky nejprve bez čidla a následně s čidlem. Rozdíl těchto indukčností se vyhodnotí jako permeabilita materiálu. Magnetické teploměry jsou vhodné pro měření velmi nízkých teplot. [1]

4.2 Bezkontaktní měření teploty

Bezkontaktním měřením teploty měříme povrchovou teplotu těles na základě snímaného elektromagnetického záření těles detektorem. Senzory záření pracují na vlnových délkách od 0,4 μm do 25 μm . Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra, oblast infračerveného spektra a oblast elektromagnetického záření, jež se označuje jako tepelné záření. Uvedený rozsah pokrývá měření teplot v rozsahu od -40 °C do +10000 °C.

Mezi důležité parametry ovlivňující přesnost měření patří emisivita tělesa, pohltivost a prostupnost prostředí, intenzita vyzařování či zářivý tok a mnoho dalších. Prostředí plné kouře, páry či nečistot ve vzduchu bude mít určitě menší

prostupnost, a proto také bude měření zatíženou určitou chybou měření. Jedná se o optickou kvalitu prostředí. U některých termokamer lze tyto rušivé parametry softwarově filtrovat. [1]

Výhody bezkontaktního měření:

- Zanedbatelný vliv měření na měřený objekt
- Možnost měření na pohybujících se objektech
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti (nebezpečné prostory, hutní objekty)
- Měření rychlých změn teploty

Nevýhody bezkontaktního měření:

- Potřeba znát správné hodnoty emisivity povrchu tělesa
- Potřeba znát správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a objektem
- Nepřesná korekce odraženého záření z okolního prostředí na objekt

4.2.1 Pyrometry

Pyrometry jsou měřicí přístroje měřící teplotu podle Stefan-Boltzmannova zákona. To znamená, že vyhodnocují procesy tepelně nezávisle na vlnové délce vyzařujícího tělesa. Zářivý tok se zaostřuje pomocí soustavy čoček s širokým spektrem prostupnosti nebo pomocí zrcadla s širokým spektrem odrazivosti. Jelikož spektrální pohltivost detektoru také není ideální, dochází u realizace ke spektrálním omezením.

Pro přesnější aplikaci vyhovující našim požadavkům lze použít také Monochromatické nebo pásmové pyrometry. Ty jsou již spektrálně selektivní a měří teplotu na povrchu tělesa ve stanoveném rozsahu vlnových délek. Toto nastavení je závislé na spektrální citlivosti detektoru záření. U měření lze také použít pyrometry s automatickou korekcí emisivity, pracující na principu střídání měření monochromatickým pyrometrem střídavě s ozařováním objektu laserem s přesně nastavenou a definovanou září. [1]



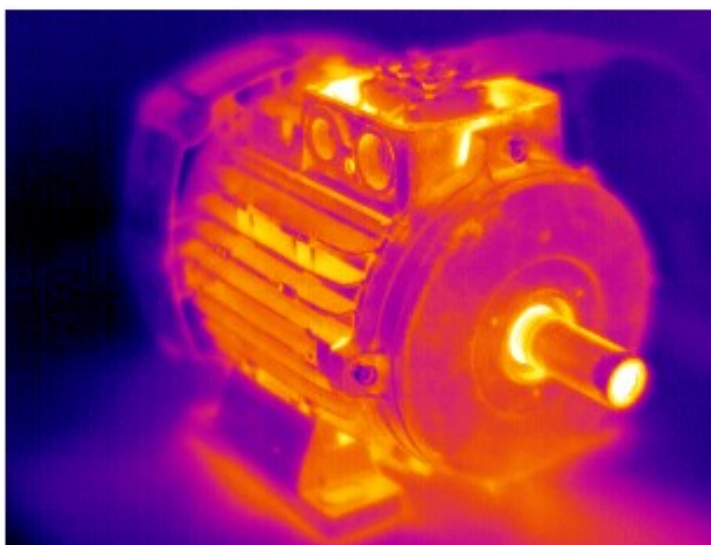
Obr. 4.3 – Pyrometr [20]

4.2.2 Termovize

Termovize je druhá metoda bezkontaktního měření teploty. Ta zaznamenává snímek teploty celého povrchu měřeného objektu do jednoho digitálního snímku. Termokamery pracují na principu snímání zářivého toku na vakuovou fotodiodou. Ozáření fotokatody zapříčiní fotoemisi elektronů, jež jsou dále zesíleny fotonásobičem a pomocí zesilovače obrazu dostaneme na výstupu obraz odpovídající teplotě měřeného objektu. Termokamery lze rozdělit na analogové (s opticko-mechanickým rozkladem obrazu) a digitální (s maticovým detektorem). V současné době se používají spíše termokamery digitální, především pro následnou analýzu obrazu, nastavení měřených parametrů či vykreslení teplotního profilu v libovolném místě obrazu. Barevné zobrazení izoterm (podle nastavení emisivity) nám nabízí celkový teplotní obraz měřeného objektu. [1]



Obr. 4.4 - Termokamera [21]



Obr. 4.5 - Snímek elektrického stroje termokamerou

5.ELEKTRICKÉ STROJE

Elektrické stroje jsou zařízení přeměňující energii elektrickou na energii elektromagnetickou. Podle této definice patří do skupiny elektrických strojů točivé stroje a transformátory.

Podle funkce se elektrické stroje dělí na:

- Motory, jež přeměňují elektrickou energii v mechanickou
- Generátory, jež přeměňují mechanickou energii v elektrickou
- Měníče, jež mění elektrickou energii v elektrickou energii jiného druhu

Protože téměř každý stroj může pracovat jako motor i generátor, případně jako měnič, můžeme elektrické stroje dělit podle principu funkce. Podle principu můžeme elektrické stroje dělit na: Transformátory, Asynchronní stroje, Synchronní stroje, Stejnoseměrné stroje a Střídavé stroje s komutátorem. [15]

Jelikož je tato práce věnována analýze teplotního pole asynchronního motoru, budeme se podrobněji věnovat pouze stroji pracujícím na tomto principu.

5.1 Asynchronní motor

Díky své provozní spolehlivosti a konstrukční jednoduchosti je trojfázový asynchronní motor nejvíce využívaným elektrickým strojem. Při proměnlivém zatížení se jeho rychlost otáčení téměř nemění, pokud není žádané řídit i rychlost otáčení.

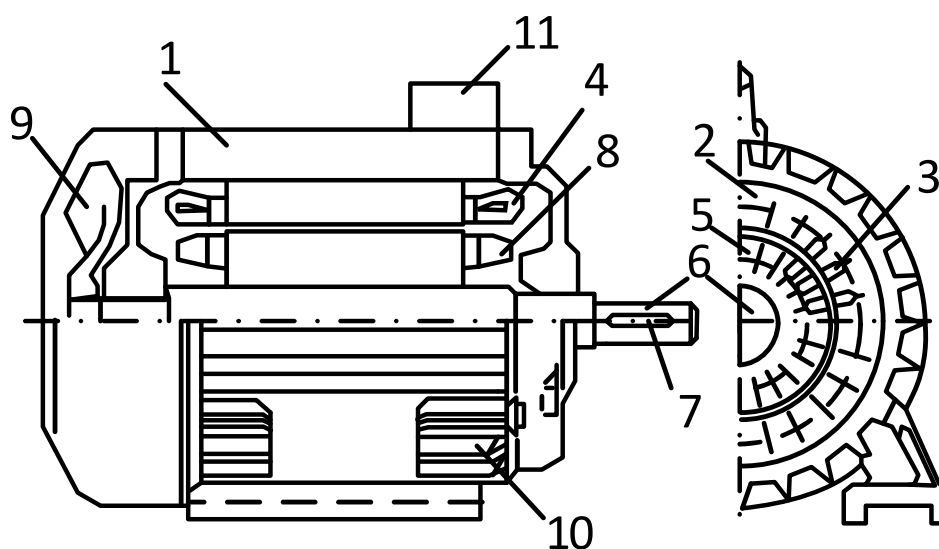
Kostra statoru (1) bývá nejčastěji vyrobena z litiny, ve které jsou uloženy plechy statoru (2). Na vnitřním obvodu statorových plechů je v drážkách (3) umístěno statorové trojfázové vinutí (4). Toto vinutí je uspořádáno tak, aby při napájení trojfázovým proudem, vytvářelo točivé magnetické pole uvnitř stroje.

Plech statorového paketu jsou izolované lakem a bývají tlusté 0,5 mm. Aby magnetický odpor a magnetizační proud byly co nejmenší, je vyžadována velikost vzduchové mezery co nejmenší, s ohledem na bezpečnost provozu a přesnost výroby. Stejně jako stator, je i rotor umístěný uvnitř statoru zhotovený z plechů. U malých motorů se rotorové plechy (5) nasazují přímo na hřídel (6), která má drážku pro pérový klín (7). Rotory s větším průměrem se nasazují na svařované hvězdice, které jsou následně na hřídel naklínovány.

Drážky rotoru bývají vyplněny vinutím nebo častěji kotvou nakrátko, jež je tvořena měděnými či hliníkovými tyčemi. Tyto tyče jsou po obou stranách rotoru spojeny kruhy, které společně s tyčemi tvoří klec (8). V dnešní době jsou nejpoužívanější lité hliníkové klece. Ve výrobním technologickém procesu se tyče, kruhy i větrací lopatky umístěné na kruzích odlévají současně. V současnosti se

většinou konstruuji úplně uzavřené motory s povrchovým chlazením, kde jsou na povrchu litinové kostry přilita chladicí žebra. Na zadní straně uvnitř motoru je ventilátor (9), který fouká chladicí vzduch na žebra kostry (10).

Do svorkovnice (11) motoru jsou vyvedeny konce statorového vinutí, kde můžou být zapojeny do hvězdy či trojúhelníku. [5]



Obr. 5.1 - Řez asynchronním motorem [5]

5.1.1 Princip činnosti

Asynchronní motory jsou střídavé stroje. Téměř vždy jsou trojfázové, i když malé motory mohou být i jednofázové.

Princip funkce spočívá na točivém magnetickém poli ve vzduchové mezeře mezi státorem a rotorem. Buzení tohoto pole vytváří trojfázové vinutí umístěné v drážkách statoru. Jednotlivé fáze jsou vůči sobě posunuty o 120° elektrických. Všechny tři fáze vinutí jsou napájeny třífázovým napětím ze souměrné soustavy, a proto jsou proudy navzájem časově posunuty také o 120° . Tyto proudy vytváří točivé magnetické pole otáčející se synchronní rychlostí n_1 .

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (5.1)$$

Kde: f_1 – kmitočet statorového napájecího napětí
 p – počet pólových párů

Vložíme-li do tohoto pole rotorové vinutí, se stejným počtem pólů, které je spojené nakrátko, může se otáčet a bude se v něm indukovat napětí s určitým kmitočtem.

$$f_2 = (n_1 - n) \cdot p \quad (5.2)$$

Kde: n – rychlost otáčení rotoru $[min^{-1}]$

Nyní bude vinutím rotoru protékat souměrná soustava proudů s kmitočtem f_2 . Nyní bude mezi statorem a rotorem vznikat točivý moment M .

$$M = \frac{(K \cdot U_i \cdot I_{1s} \cdot \cos\varphi)}{\omega} \quad (5.3)$$

Kde: U_i – indukované napětí ve vinutí stojícího rotoru

$\cos\varphi$ – účinník

I_{1s} – statorový proud

ω – úhlová rychlost rotoru ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)

K – konstrukční konstanta uspořádání

Můžeme také vypočítat skluz s , který udává poměrnou změnu rychlosti otáčení rotoru vůči synchronní rychlosti otáčení magnetického pole. [6]

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \quad (5.4)$$



Obr. 5.2 - Asynchronní motor [22]

5.2 ztráty a účinnost elektrického stroje

Ve všech elektrických strojích se určitá část přiváděné energie mění na energii tepelnou. Tato tepelná energie se ve stroji dále nevyužije, a tedy představuje ztráty. Účinnost stroje a jeho ekonomické využití je dána především velikostmi ztrát.

Ztráty vznikající v elektrickém stroji při přeměně energie můžeme rozdělit do těchto skupin: [5]

1. Ztráty Joulovy ve vodičích a dalších vodivých částech stroje ΔP_i .

Ztráty ve vinutí závisí na ohmickém odporu vinutí R a na kvadrátu protékajícího proudu I .

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \quad (5.5)$$

2. Ztráty v železe (magnetické)

Ztráty v železe vznikají ve feromagnetických částech stroje, které se nachází v poli působení střídavého magnetického pole ΔP_{Fe} .

Ztráty v železe (v magnetickém obvodu stroje) se dále skládají ze ztrát hysterezních ΔP_h a ztrát způsobených vířivými proudy ΔP_v . Tyto ztráty můžeme vypočítat pomocí následujících vztahů:

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^n \cdot m \quad (5.6)$$

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^n \cdot m \quad (5.7)$$

3. Ztráty dielektrické v izolacích.

Tyto ztráty se nacházejí v poli působení střídavého elektrického pole ΔP_i .

4. Ztráty mechanické ΔP_{mech}

Mechanické ztráty vznikají na pohybujících se částech stroje. K těmto ztrátám patří například tření rotujících částí o vzduch (ventilační ztráty), tření kartáčů o kroužky či komutátor, tření v ložiscích aj.

Celkové ztráty se spočtou podle vztahu:

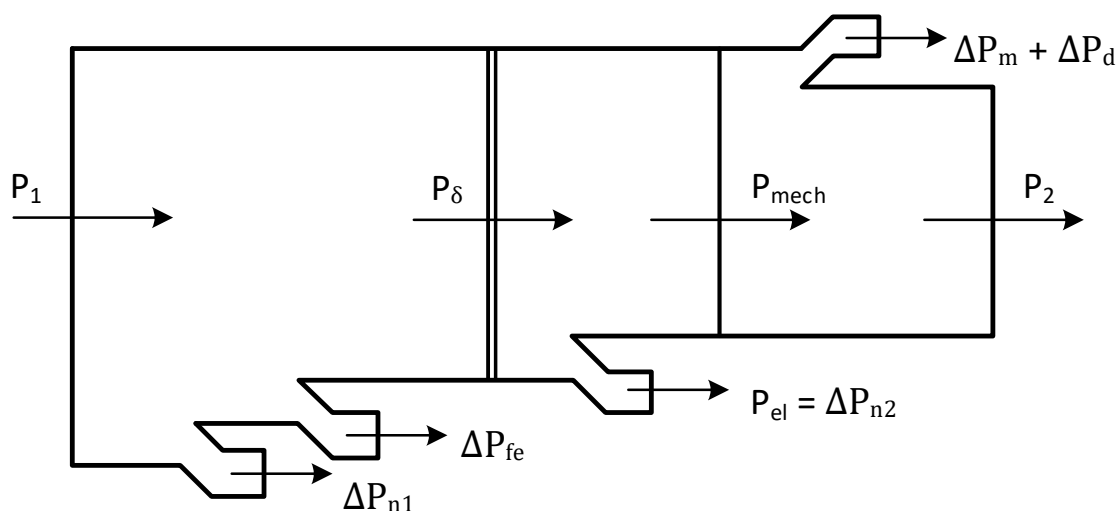
$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_i + \Delta P_{mech} \quad (5.8)$$

Je-li výkon stroje P_2 a příkon stroje P_1 , potom platí že:

$$P_1 - \Delta P = P_2 \quad (5.9)$$

Účinnost stroje se vypočítá podle vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \quad (5.10)$$



Obr. 5.3 - Tok výkonu v asynchronním motoru [6]

Kde: P_1 – Příkon motoru
 ΔP_{n1} – činné ztráty ve vinutí statoru
 ΔP_{Fe} – ztráty v magnetickém obvodu motoru
 P_δ – výkon ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem
 ΔP_{n2} – činné ztráty ve vinutí rotoru
 P_{mech} - mechanický výkon stroje
 $\Delta P_m + \Delta P_d$ – mechanické a ventilační ztráty
 P_2 – výkon na hřídeli

5.3 Měření ztrát v elektrických strojích

Každé zařízení, které slouží k přeměně energie, mění část této energie v neužitečnou, ztrátovou formu. Při elektromechanické přeměně energie dochází v elektrickém stroji ke ztrátám ve všech částech.

Pojem ztrátová energie popisuje rozdíl vstupující energie, která je odebrána ze zdroje do zařízení, a energií užitečnou na jeho výstupu. Účinnost elektrického pohonu je tedy závislá na energii odebrané elektrickým strojem ze sítě a energií, jež je spotřebována pracovním mechanismem. [3]

5.3.1 Měření ztrát naprázdno

Při chodu naprázdno se otáčí hřídel motoru bez zátěže. Skluz motoru je velmi malý, za předpokladu konstantního napájecího napětí. Za těchto podmínek měříme proud naprázdno ve fázích I_{10} a příkon naprázdno P_1 dodávaný do statorového

vinutí. Měření naprázdno se provádí změnou hodnot napětí U_1 . Zkouška probíhá nastavováním hodnot od $(1,1 \text{ až } 1,3) U_n$ a snižováním napětí až k $0,3 U_n$. Měření probíhá s konstantním jmenovitým kmitočtem. U zkoušek strojů o větších výkonech je nutno provádět zkoušku dostatečně dlouho pro získání ustálené teploty. Podle ČSN EN – 60034-2-1 je ustálená teplota stav, kterého je dosaženo, pokud se oteplení několika částí stroje nemění o více než 2 K za hodinu.

Z měření dostaneme následně charakteristiky stroje při chodu naprázdno. Výsledná charakteristika nám udává závislost příkonu naprázdno P_{10} , účinník naprázdno $\cos \varphi_0$ a proud naprázdno I_{10} .

Známe-li z měření odpor statorového vinutí a proud naprázdno, můžeme vypočítat ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j10} a pokud jej odečteme od ztrát naprázdno P_0 , spočítáme tak součet mechanických ztrát a ztrát v železe. [18]

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (5.11)$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_0 - 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (5.12)$$

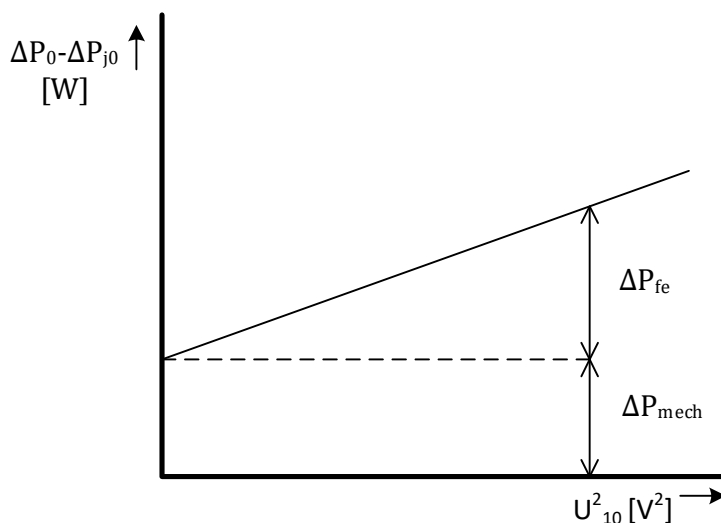
Proud naprázdno spočteme jako aritmetický průměr proudů do všech fází stroje:

$$I_{10} = \frac{I_{10} + I_{20} + I_{30}}{3} \quad (5.13)$$

Účinník naprázdno získáme z následujícího vztahu:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{10} \cdot I_{10}} \quad (5.14)$$

Ztráty změřené při zkoušce naprázdno jsou součtem Joulových ztrát ve vinutí, mechanických ztrát a ztrát v železe.



Obr. 5.4 - Rozdělení ztrát mechanických a ztrát v železe [18]

Na Obr. 5.4 můžeme pozorovat rozdělení ztrát mechanických a ztrát v železe pomocí extrapolace křivky. Na ose x je uvedeno napětí U_I v druhé mocnině, protože při menších napětích je výsledná křivka mírně nelineární. Tento jev se při extrapolaci eliminuje.

Při měření naprázdno se díky malému skluzu zanedbávají ztráty vznikající v magnetickém obvodu statoru. Joulovy ztráty v rotoru jsou díky chodu naprázdno velmi malé, a proto je můžeme také zanedbat. [18]

5.3.2 Měření ztrát nakrátko

Měření ztrát nakrátko se provádí za účelem zjištění velikosti ztrát ve vinutí, rozběhového proudu, proudu nakrátko, účinníku nakrátko a záběrného momentu. Toto měření se provádí při mechanicky zabrzděném rotoru, kdy je skluz rotoru roven 1 ($s=1$). Na vinutí statoru je přivedeno snížené napětí (přibližně $0,2 U_n$) o jmenovitém kmitočtu. Následně zvyšujeme napětí, dokud hodnota proudu nakrátko nedosáhne hodnoty I_n až $2 I_n$ (v závislosti na typu stroje). Po odečtení hodnot napětí U_{1k} , proudu I_{1k} , příkonu P_k a momentu M motor vypneme. Během zkoušky, kdy je motor ve stavu spouštění, můžeme změřit také hodnoty záběrného momentu a záběrného proudu. U zkoušek strojů do 100 kW je doporučeno záběrný moment měřit dynamometrem a u strojů větších výkonů je možné záběrný moment určit výpočtem.

Zkouška nakrátko probíhá při zabrzděném rotoru a jelikož neprobíhá cirkulace vzduchu ve stroji, je zapotřebí provést měření v co nejrychlejším čase. Teplota zatěžovaných částí se poměrně rychle zvyšuje, a protože je nejvíce namáháno vinutí, může po překročení dovoleného oteplení dojít k poškození izolace vinutí.

Z naměřených hodnot můžeme vynést charakteristiku zkoušky nakrátko $I_{1k}=f(U_{1k})$, která by měla být teoreticky lineární. Proud I_{1k} je však ovlivňován vzájemnou polohou zubů statoru a rotoru, kde dochází ke změnám rozptylového pole ve vzduchové mezeře. [18]

Proud nakrátko spočteme jako aritmetický průměr proudů do všech fází stroje:

$$I_{1k} = \frac{I_{1k} + I_{2k} + I_{3k}}{3} \quad (5.15)$$

Účinník nakrátko:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_{1k} \cdot I_{1k}} \quad (5.16)$$

Naměřené ztráty nakrátko jsou složeny z Joulových ztrát a ztrát přídatných:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_{1k} \cdot I_{1k}} \quad (5.17)$$

Naměřené ztráty nakrátko jsou složeny ze ztrát Joulových a ztrát přídatných.

$$P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (5.18)$$

6. CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Ztráty v elektrických strojích se přeměňují na tepelnou energii. Pokud se tato energie nebude nikam odvádět, může zapříčinit poškození nebo dokonce zničení celého stroje. Z tohoto důvodu se navrhuje chlazení, které má za úkol odvádět tuto energii a předcházet poškození. Chlazení stroje se dá po způsobu provedení rozdělit na:

- stroje s přirozeným chlazením
- stroje s vlastním chlazením
- stroje s cizím chlazením

6.1 Stroje s přirozeným chlazením

Tyto stroje jsou konstruovány tak, že nemají žádný nucený odvod tepla, mají pouze tzv. pasivní chladič, což zpravidla bývá žebrování na povrchu motoru. Používá se u motorů malých výkonů, které nejsou přetěžovány, a motorů které jsou používány pouze v přerušovaném chodu. Celý pohon pak musí být navržen tak, aby se motor stačil ochladit. Výhodou tohoto typu chlazení je, že nám odpadají ztráty ventilační a s nimi spojená větší hlučnost motoru. Nevýhodou je, pokud by byl motor v chodu delší dobu, než pro jakou je konstruován, mohla by rostoucí teplota uvnitř motoru stroj zničit, pokud by nebyla přítomna teplotní ochrana.

6.2 Stroje s vlastním chlazením

U tohoto typu chlazení bývá zpravidla ventilátor v radiálním nebo axiálním provedení umístěný přímo na hřídeli motoru. Princip tohoto chlazení je založen na nuceném oběhu vzduchu z povrchu motoru, případně ze vzduchové mezery. U radiálního ventilátoru vzduch vstupuje do ventilátoru vodorovně s osou a opouští ventilátor kolmo na osu. U axiálního provedení proudí vzduch ve směru osy otáčení oběžného kola. Tento typ se používá pro větší objemy chladicího plynu. Tento způsob chlazení se ve velké míře používá u středních i velkých typů motorů. [19]

6.3 Stroje s cizím chlazením

Tento způsob chlazení se používá pro velké výkony motorů, např. pro velké synchronní generátory. Jako chladicí médium je zde použita převážně voda. Princip chlazení spočívá v tom, že v obalu statoru jsou vytvořeny kanálky, kde pomocí čerpadla cirkuluje chladicí kapalina a stroj ochlazuje. Další možností chlazení kapalinou je, že stroj má dutý rotor a v něm cirkuluje chladicí kapalina. Kapalinové chlazení je účinnější než předchozí typy. Je ale konstrukčně náročné, tudíž drahé.

Další riziko je spojené s nutností cirkulace kapaliny, která je zpravidla nucená a zajišťuje ji čerpadlo. V případě, že dojde k poruše na této části zařízení a oběh kapaliny ustane, dojde poměrně rychle k prudkému nárůstu teploty, a to může vést ke zničení celého stroje. Proto se musí oběhová čerpadla zálohovat. [19]

6.4 Chlazení otevřených strojů

U malých a středních motorů lze zanedbat tepelné spády, protože se předpokládá, že tepelná výměna mezi jednotlivými částmi stroje (např. mezi plechy a vinutím) nenastává.

Otevřené stroje mají vždy vlastní větrání. Chladicí vzduch je proháněn motorem podél ochlazovaných ploch, kde ztráty vznikají. Těmito ztrátami se vzduch stále ohřívá, až do momentu, kdy ze stroje oteplen vychází do okolního prostředí. [15]

6.5 Chlazení zavřených strojů

Chlazení zavřených strojů je vzhledem k proudění tepla k chladicím povrchům diametrálně odlišné od chlazení strojů otevřených. Teplo přechází z klece rotoru přes vzduchovou mezeru do paketu statorových plechů, z kterých se přes povrch kostry předává chladicímu vzduchu. Joulovy ztráty klece rotoru P_{Cu2} se tak šíří dvěma tepelnými toky. Tok Φ_1 teče přes vzduchovou mezeru do statoru a odtud k chladicím plochám žebrování kostry a tok Φ_2 se odevzdává povrchem kruhů klece vnitřnímu vzduchu a dále okolnímu vzduchu přes štíty motoru. Podrobněji se budeme chlazením zavřených strojů zabývat v následujících kapitolách. [15]

7. TEPELNÝ VÝPOČET ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Teplo vzniká ve stroji konajícím práci a zahřívá jeho jednotlivé části. Pokud dojde k nadměrnému zvýšení teploty, může dojít ke snížení mechanické a elektrické izolace vinutí elektrických strojů. Maximální dovolenou teplotu určuje třída izolace.

Teplota na určitých částech stroje závisí na teplotě okolního prostředí. Protože teplota okolního prostředí nutně musí kolísat, zavádí se u částí elektrického stroje pojem oteplení: [3]

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_v \quad (7.1)$$

Kde: ϑ – teplota části elektrického stroje

ϑ_v – teplota okolního prostředí

Parametry udávané na štítku elektrického stroje jako jsou jmenovitý výkon, napětí, proud, otáčky, účinnost, účiník atd. se vztahují k práci stroje při teplotě okolního vzduchu + 40 °C a do výšky 1000 m nad mořem. Všechny dovolená mezní oteplení částí elektrických strojů jsou dány normou ČSN 60034.

Odpor vinutí je závislý na teplotě, která se měří odporovou metodou, při které se měří odpor vinutí. Oteplení vinutí se následně vypočítá dle následujícího vztahu:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_\vartheta - R_0}{R_0} (235 + \vartheta_0) + \vartheta_0 - \vartheta_v \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.2)$$

Kde: R_ϑ – Odpor vinutí v teplém stavu $[\Omega]$

R_0 – Odpor vinutí v chladném stavu $[\Omega]$

ϑ_0 – teplota vinutí v chladném stavu $[\text{°C}]$

ϑ_v – teplota okolního prostředí $[\text{°C}]$

Pokud je vinutí stroje vyrobeno z hliníku, a ne z mědi, dosadí se do vztahu (7.2) pro oteplení hodnota 245.

ČSN 60034 definuje celkem osm jmenovitých druhů zatížení, avšak nejčastěji se můžeme setkat s:

S1 – Trvalé zatížení

S2 – Krátkodobý chod s dobou trvání zatížení $t_z = 10, 30, 60, 90 \text{ min}$

S3 – Přerušovaný chod s poměrnou dobou trvání zatížení 15, 25, 40, 60 % pracovního cyklu

S4 – Přerušované zatížení, při kterém se střídá jmenovitý chod a chod naprázdno s poměrem 15, 25, 40 a 60 % pracovního cyklu.

Podle druhu pracovního režimu můžeme rozlišovat tepelné výpočty na určení oteplení různých částí stroje:

- Výpočet ustáleného oteplení – při trvalém zatížení stroje, kde již další nárůst teploty nenastává
- Výpočet přechodných tepelných dějů – při krátkodobé nebo přerušované práci stroje

Přenos tepla do okolního prostředí nastává vzhledem k tepelné vodivosti materiálu chladícího povrchu. Ve většině případů se u elektrických strojů jako chladící prostředí používá vzduch. Při předávání tepla na rozhraní chlazeného a ohřívaného povrchu je tepelný tok předávaný povrchem $S(\text{m}^2)$ dán vztahem:

$$\Phi = \alpha(\vartheta - \vartheta_v)S = \alpha\Delta\vartheta S \quad [\text{W}] \quad (7.3)$$

Pro teplotní spád mezi povrchem a vzduchem pak platí:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Phi}{\alpha S} = \frac{p}{\alpha} \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.4)$$

Kde: p – hustota tepelného toku $[\text{W.m}^{-2}]$
 α – součinitel přestupu tepla povrchem $[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$

Na cestě tepelného toku Φ vzniká teplotní spád v železe a v přechodu mezi různými materiály. Hustota tepelného toku ve směru jeho pohybu je přímo úměrná gradientu v tomto směru

$$p = -\lambda \text{ grad } \Delta\vartheta \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (7.5)$$

Kde: λ – součinitel tepelné vodivosti $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

Znaménko mínus ve vzorci (7.5) značí, že se teplota snižuje ve směru tepelného toku. [3]

Tab. 7.1 - Velikosti součinitele tepelné vodivosti u různých materiálů [3]

Název materiálu	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Měď	380
Hliník	220
Stříbro	420
Elektrotechnická ocel (plechy)	30
Vzduch při 0,1 Mpa, 40 °C	0,0266
Voda při 40 °C	0,633
Transformátorový olej při 40 °C	0,164
Izolace drážek statoru asynchronních strojů	0,1
Izolace drážek vinutí kotvy rotoru	0,1

7.1 Ohřívání homogenního tělesa

Ohřívání homogenního tělesa lze použít pro výpočet ohřevu pro ustálené i přechodné tepelné děje. Můžeme zde předpokládat, že teplo předávané z povrchu tělesa S je při konstantních ztrátách ΔP úměrné oteplení povrchu. [3]

$$\Delta P \, dt = cm \, d(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta \, dt \quad (7.6)$$

Kde: c – měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹]
 m – hmotnost tělesa [kg]

Po dosažení konečného oteplení tělesa a ustáleného stavu teploty, je veškeré další teplo generované tělesem předáváno okolnímu prostředí:

$$\Delta P \, dt = \alpha S \Delta\vartheta \, dt \quad (7.7)$$

Nebo

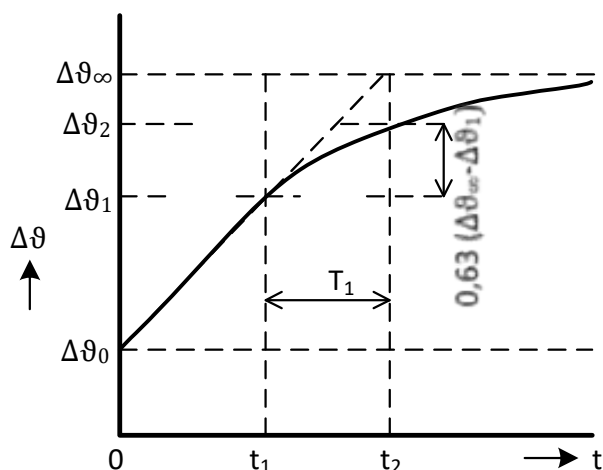
$$\Delta P = \alpha S \Delta\vartheta \quad (7.8)$$

Řešením rovnice (7.8) je:

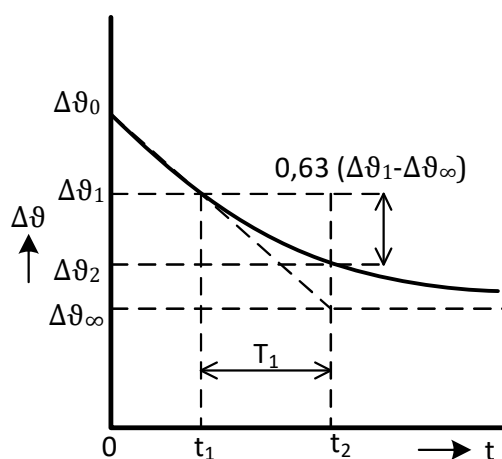
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_\infty - \Delta\vartheta_0) \cdot (1 - e^{-t/T_1}) \quad (7.9)$$

Kde: $\Delta\vartheta_0$ – počáteční oteplení tělesa
 T_1 – časová konstanta ohřevu tělesa - $T_1 = cm/\alpha S$

Křivky ohřevu a ochlazování jsou zobrazeny na Obr. 7.1 a Obr. 7.2



Obr. 7.2 - Křivka ohřevu [3]



Obr. 7.1 - Křivka ochlazování [3]

Konečné oteplení těleso nabyde teoreticky za nekonečně dlouhou dobu. Prakticky však platí, že těleso dosáhne ustáleného oteplení (s přesností do 5%) za dobu přibližně tří až čtyřnásobku času T_1 . [3]

7.2 Výpočet ustáleného oteplení

Hlavní zdroje tepla v elektrických strojích jsou jejich vinutí (Joulovy ztráty) a konstrukční části železných, feromagnetických materiálů v magnetickém obvodu (hysterezní a vířivé ztráty). Vedlejší zdroje tepla jsou z oteplení kluzného kontaktu či mechanických a ventilačních ztrát. [3]

7.3 Výpočet pomocí náhradních tepelných obvodů

U metody tepelné sítě se nahrazuje řešený objekt za soustavu jednotlivých těles (částí), které jsou tepelně mezi sebou propojeny s místy odvodu tepla. Tuto soustavu nazýváme náhradní tepelnou sítí a představuje model cest tepelného toku. Tepelná síť je sestavena ze zdrojů ztrát (tepla), větví s tepelnými odpory, uzlů a norů (místa odvodu tepla do vnějšího okolí). Každá větev má hodnotu svého tepelného odporu a každý zdroj je charakterizován velikostí tepelného výkonu (ztrát). Všechny zdroje, uzly a nory jsou charakterizovány svým středním oteplením.

Jednotlivé větve sítě mohou sestávat z více tepelných odporů vzájemně zapojených, podobně jak při zapojení elektrických odporů. Tepelné odpory můžeme řadit sériově nebo paralelně. [3]

Sériové řazení tepelných odporů, přes které prochází stejný tepelný tok:

$$R_{\theta s} = \sum_{i=1}^n R_{\theta si} \quad (7.10)$$

Paralelní řazení tepelných odporů:

$$R_{\theta p} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_{\theta pi}}}} \quad (7.11)$$

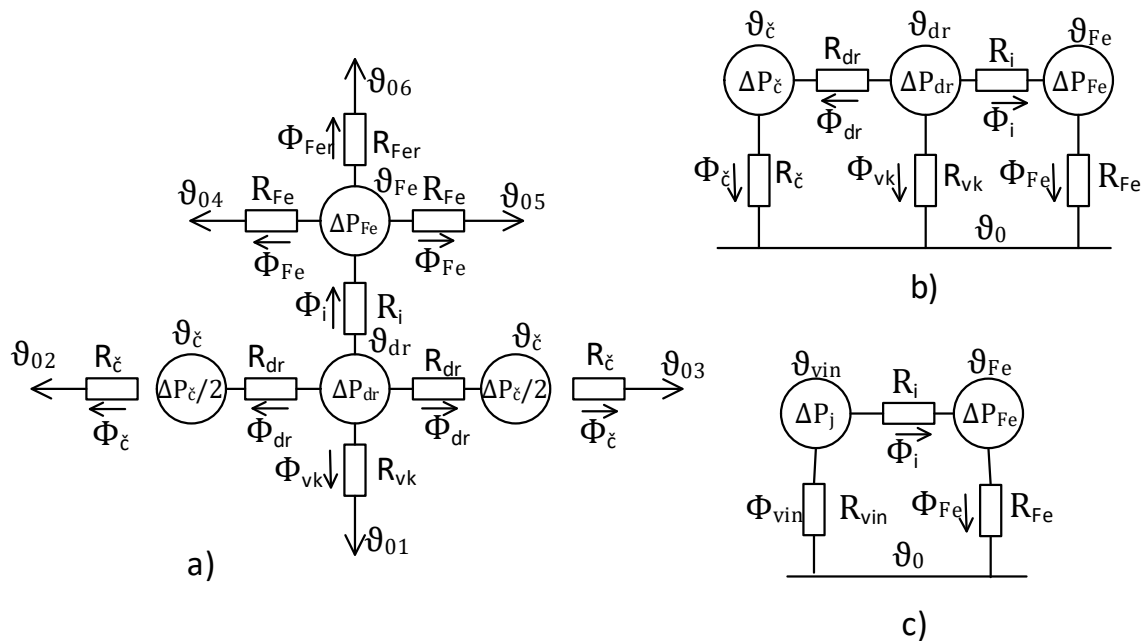
Výpočet pomocí náhradních tepelných obvodů využívá tepelných odporů sloužící pro analytický návrh oteplení elektrických či mechatronických obvodů. Výpočet pomocí náhradních tepelných obvodů se používá u dvourozměrných ale i třírozměrných úloh, kde se počítá se tepelnými toky ve všech směrech. Těmito výpočty můžeme určovat střední teploty určitých částí stroje, jež následně chápeme jako homogenní tělesa. [3]

Základní obecná rovnice, která platí pro každou část tepelného schématu je:

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \Phi_{12} \cdot R_{12} \quad (7.12)$$

Kde: Φ_{12} – tepelný tok mezi body 1 a 2 [W]
 ϑ_1, ϑ_2 – Střední teploty na těchto bodech [°C]
 R_{12} – Tepelný odpor mezi body 1 a 2 [K.W⁻¹]

Jednotlivé prvky ve schématu představují určité části stroje. Čím více máme v analýze těchto prvků, tím přesnější je výpočet, avšak takový výpočet je složitější na samotný výpočet. Proto je žádoucí počítat s určitým zjednodušením výchozích údajů, ale v takové míře, aby výsledné hodnoty odpovídaly s dostatečnou přesností.



Obr. 7.3 - náhradní tepelný obvod satoru elektrického motoru [3]

- a) Různé teploty vzduchu u ochlazovaných povrchů
- b) Konstantní teplota vzduchu u ochlazovaných povrchů
- c) Schéma při R_{12}

1. Tepelný odpor drážkové izolace:

$$R_i = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot S_i} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (7.13)$$

Kde: b_i – tloušťka drážkové izolace [m]
 λ_i – součinitel tepelné vodivosti izolace [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 S_i – Plocha izolace [m^2]
 $S_i = Q \cdot O_d \cdot l_{Fe} = Q \cdot O_d \cdot (n_{vk} + 1) \cdot l \quad [\text{m}^2] \quad (7.14)$

Kde: Q – počet drážek satoru [-]
 O_d – obvod drážky [m]
 n_{vk} – počet radiálních ventilačních kanálů [-]
 l – osová délka železa satoru [m]
 $O_d = 2(b_d + h_d - h_k) \quad [\text{m}] \quad (7.15)$

Kde: b_d, h_d – šířka, výška drážky [m]
 h_k – výška klínové části drážky [m]

2. Tepelný odpor čel vinutí

$$R_{\xi} = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot S_{\xi}} + \frac{1}{\alpha_{\xi} \cdot S_{\xi}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7.16)$$

Kde: b_i – tloušťka izolace cívky [m]
 λ_i – součinitel tepelné vodivosti izolace [W.m⁻¹.K⁻¹]
 S_{ξ} – ochlazovací plocha čel vinutí [m²]
 $S_{\xi} = Q \cdot O_c \cdot l_{\xi}$ (7.17)

Kde: O_c – obvod cívky [m]
 l_{ξ} – délka čela [m]
 $\alpha_{\xi} = 10 \cdot (1 + 0,54v^2)$ (7.18)

Kde: v – rychlost vzduchu [m · s⁻¹]

3. Tepelný odpor vinutí

$$R_v = \frac{l_1 + l_{\xi}}{12 \cdot Q \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda} = \frac{R'_{dr}}{2} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7.19)$$

Kde: V_{ef} – počet vodičů v drážce [-]
 S_{ef} – Průřez vodiče [m²]
 λ – součinitel tepelné vodivosti kovu [W.m⁻¹.K⁻¹]

4. Tepelný odpor v radiálních tepelných kanálech od vinutí ke chladicímu vzduchu

$$R_{vk} = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot S_{vk}} + \frac{1}{\alpha_{vk} \cdot S_{vk}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7.20)$$

Kde: b_i – tloušťka kanálku [m]
 λ_i – součinitel tepelné vodivosti izolace [W.m⁻¹.K⁻¹]
 S_{vk} – plocha povrchu vinutí v kanálech [m²]
 b_{vk} – šířka radiálního kanálu [m]
 α_{vk} – součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]

5. Tepelný odpor železa statoru (rotoru)

$$R_{Fe} = \frac{l}{\alpha_{vk} \cdot S_{paq}} + \frac{l_{pa}}{6\lambda_{Feq} \cdot S_{paq}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7.21)$$

Kde: α_{vk} – součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]
 S_{paq} – plocha povrchu paketů předávající teplo [m²]

$$S_{paq} = \pi \cdot (D_e - h_{jl}) \cdot h_{jl} \cdot (n_{vk} + 1) \quad [m^2] \quad (7.22)$$

Kde: D_e – vnější průměr statoru $[m^2]$
 h_{jl} – výška jha statoru $[m]$
 l_{pa} – délka paketu statoru $[m]$
 λ_{Feq} – součinitel tepelné vodivosti oceli $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
 n_{vk} – počet radiálních kanálů $[-]$

6. Tepelný odpor vzduchové mezery

$$R_\delta = \frac{1}{\alpha'_\delta \cdot S_\delta} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7.23)$$

Kde: S_δ – plocha vzduchové mezery, ze které se odvádí teplo $[m^2]$
 α'_δ – součinitel přestupu tepla $[W \cdot mm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$

Velikost hodnoty součinitele přestupu tepla vzduchové mezery závisí na velikosti vzduchové mezery δ a na drsnosti povrchu, jež je dána tolerancí opracování e . obvykle tolerance opracování bývá $e = 0,08$ až $0,1$ mm.

Hodnotu součinitele přestupu tepla získáme z Nusseltova čísla:

$$\alpha'_\delta = [Nu] \frac{\lambda}{2\delta} \quad (7.24)$$

Kde: λ – součinitel tepelné vodivosti vzduchu $\lambda = 0,026$ $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
 Nu – Nusseltovo číslo

$$Nu = \frac{0,212 \cdot f \cdot Re}{1 - \frac{3,81}{f \cdot Re}} \quad (7.25)$$

Kde: f_x – činitel drsnosti povrchu

$$f_x = \frac{1}{4[1,11 + 2\log(\delta/e)]^2} \quad (7.26)$$

Kde: Re – Reynoldsovo číslo, $Re = v \cdot S/v$

v – obvodový rychlost rotoru $[m \cdot s^{-1}]$
 ν – kinematická vazkost vzduchu, $\nu = 2 \cdot 10^{-5}$ $[m^2 \cdot s^{-1}]$
 δ – vzduchová mezera $[m]$

Z pohledu tepelných ztát můžeme rozdělit stator a rotor na tři homogenní tělesa, která jsou zdrojem tepla. Jedná se o drážkovou část vinutí statoru (rotoru) $\Delta P_{dr1,2}$, železo statoru (rotoru) se ztrátami ΔP_{Fe} a dvě strany čel vinutí s celkovými

ztrátami ΔP_{ζ} . Každá tato část vytvoří tepelné toky, které jsou různé, za předpokladu rozdílného chlazení jednotlivých částí stroje. [3]

Φ_i – Tepelný tok procházející stěnami drážek, který má spad na tepelném odpor drážkové izolace R_i .

Φ_{vk} – Tepelný tok směřující přes tepelný odpor R_{vk} k chladicímu ventilačním kanálům v radiálním směru.

Φ_{dr} – Tepelné toky směřující přes tepelné odpory R_{dr} od drážek vinutí.

Podle schématu na Obr.7.2 můžeme sestavit osm rovnic o osmi neznámých, které nám určí hodnoty teploty drážek vinutí, čel vinutí a železa statoru, ale také všechny tepelné toky.

$$\Delta P_{dr} + \Delta P_{\zeta} + \Delta P_{Fe} = \Phi_{\zeta} + \Phi_{vk} + \Phi_{Fe} \quad (7.27)$$

$$\Phi_{\zeta} = \Delta P_{\zeta} + \Phi_{dr} \quad (7.28)$$

$$\Phi_{Fe} = \Delta P_{Fe} + \Phi_i \quad (7.29)$$

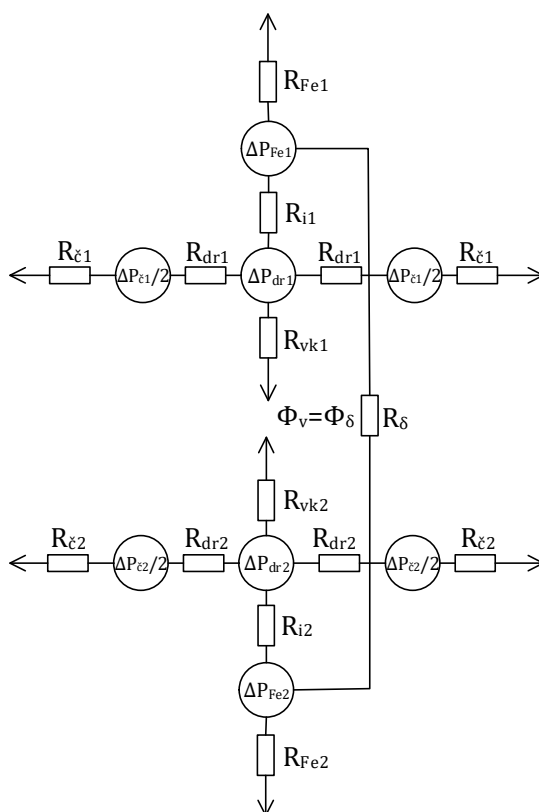
$$\vartheta_{dr} - \vartheta_0 = \Phi_{vk} \cdot R_{vk} \quad (7.30)$$

$$\vartheta_{\zeta} - \vartheta_0 = \Phi_{\zeta} \cdot R_{\zeta} \quad (7.31)$$

$$\vartheta_{Fe} - \vartheta_0 = \Phi_{Fe} \cdot R_{Fe} \quad (7.32)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{\zeta} = \Phi_{dr} \cdot R_{dr} \quad (7.33)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe} = \Phi_i \cdot R_i \quad (7.34)$$



Obr. 7.4 - úplné náhradní schéma asynchronního motoru [3]

Řešení tepelné sítě je analogické s řešením elektrického obvodu a vede k vytvoření soustavy lineárních rovnic. Popis tepelné sítě vychází ze zachování Kirchhoffových zákonů:

$$\text{I. } \sum_i z_i = 0 \quad (7.35)$$

$$\text{II. } \sum_i z_i \cdot R_i + \sum_i P_{0i} = 0 \quad (7.36)$$

Ustálený stav tepelné sítě o n uzlech řeší soustava n lineárních rovnic. Ve všech uzlech může být zdroj tepelné energie Φ_{0i} , jež je spojen přes odpory R_{ij} a přes odpor R_{pi} chlazen do okolního prostředí ϑ_{0i} . Výsledná soustava rovnic má tento tvar:

$$\mathcal{G}_i \cdot \left(\frac{1}{R_{1i}} + \frac{1}{R_{2i}} + \dots + \frac{1}{R_{ni}} + \frac{1}{R_{pi}} - \varepsilon_i \cdot p_{0i} \right) - \frac{\mathcal{G}_1}{R_{1i}} - \frac{\mathcal{G}_2}{R_{2i}} - \dots - \frac{\mathcal{G}_n}{R_{ni}} = p_{0i} + \frac{\mathcal{G}_{oi}}{R_{pi}} \quad (7.37)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Pro zjednodušení se může tento systém rovnic psát v maticovém tvaru:

$$\begin{vmatrix} A_1 & -a_{12} & -a_{13} & \dots & -a_{1n} \\ -a_{21} & A_2 & -a_{23} & \dots & -a_{2n} \\ -a_{31} & -a_{32} & A_3 & \dots & -a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & -a_{n3} & \dots & A_n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \mathcal{G}_1 \\ \mathcal{G}_2 \\ \mathcal{G}_3 \\ \vdots \\ \mathcal{G}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_{01} + \mathcal{G}_{o1}/R_{p1} \\ p_{02} + \mathcal{G}_{o2}/R_{p2} \\ p_{03} + \mathcal{G}_{o3}/R_{p3} \\ \vdots \\ p_{0n} + \mathcal{G}_{on}/R_{pn} \end{vmatrix} \quad (7.38)$$

Kde: $a_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ij}} \text{ pro } i, j = 1, 2, \dots, n$$

Řešením tohoto systému rovnic získáme hodnoty ustáleného oteplení v jednotlivých částech stroje. [3]

Rovnice tepelné rovnováhy:

Pomocí rovnice tepelné rovnováhy lze vypočítat průběh oteplení elektrického stroje i hodnoty okamžitého oteplení. Přechodový děj oteplování se blíží k hodnotě ustáleného oteplení a má tvar exponenciály.

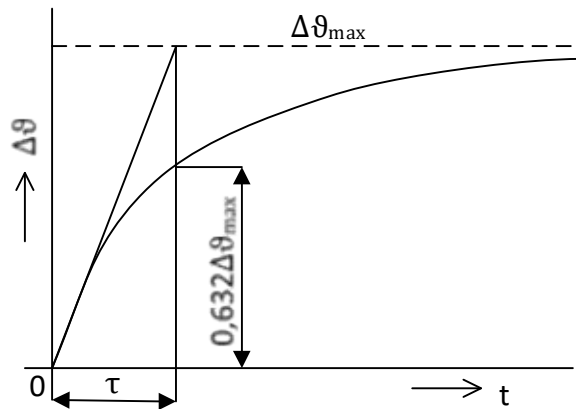
$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\alpha_0 \cdot A}{c \cdot V} t} \right] = \Delta\vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (7.39)$$

Ustálené oteplení popisuje tepelný stav objektu, který dosáhl maximálního oteplení povrchu, a tudíž všechno další dodané teplo je zcela odváděno povrchem do chladícího prostředí. Rovnici ustáleného oteplení popisuje rovnice (7.40). Tepelné účinky proudu a ztrát ve vodiči popisuje oteplovací charakteristika, kterou můžeme vidět na

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (7.40)$$

Rovnice výše má potom vlastní tepelnou časovou konstantu:

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (7.41)$$



Obr. 7.5 - Oteplovací charakteristika

Tepelná časová konstanta τ popisuje čas, kdy by objekt měl nabýt ustáleného oteplení, pokud by se neodvádělo žádné teplo z povrchu objektu. V takovém případě by platilo, že koeficient přestupu tepla má hodnotu $\alpha_0 = 0$.

Z rovnice (7.39) vyplývá, že po oteplení tělesa proudem nabyde během doby $\tau = t$ hodnotu oteplení, jež je popsána v rovnici (7.42).

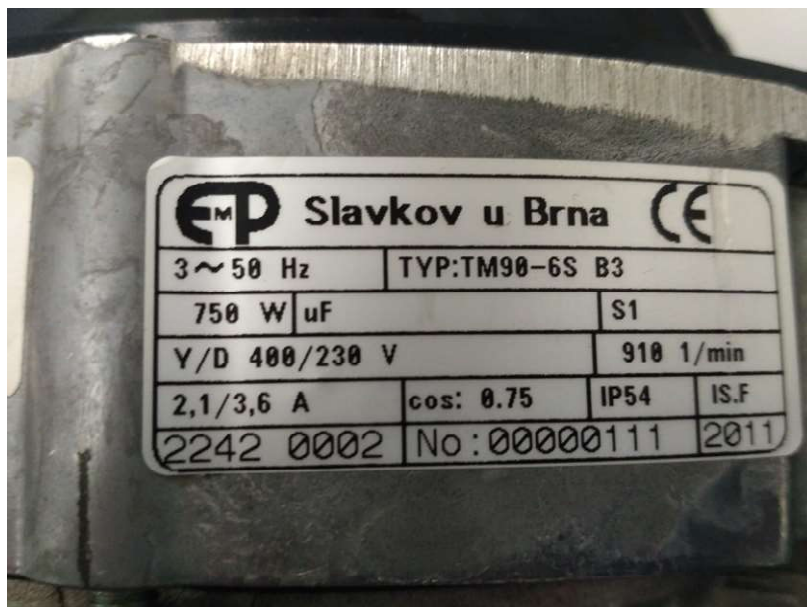
$$\Delta\vartheta_v = \Delta\vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot \vartheta_{max} \quad (7.42)$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7.43)$$

V rovnici (7.42) předpokládáme zjednodušené idealizované podmínky s tím, že časová konstanta zůstává neměnná. Ve skutečnosti se totiž měrná objemová kapacita c i součinitel přestupu tepla α_0 během oteplování lehce mění. Proto se vypočítaná oteplovací křivka nikdy nekryje s křivkou naměřenou. V reálném případě proto časová konstanta τ není konstantní, avšak pro zjednodušený výpočet se bere v potaz její idealizované znění viz rovnice (7.42) a (7.43).

8. MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Pro měření oteplení elektrického stroje byl vybrán asynchronní motor typ: TM90-6S B3.



Obr. 8.1 - Štítkové hodnoty měřeného stroje

8.1 Podmínky pro oteplovací zkoušky

Podmínky pro oteplovací zkoušky:

Pro otevřené nebo uzavřené elektrické stroje bez výměníku tepla, tedy ty, které jsou chlazené okolním vzduchem nebo plynem, se musí teplota okolního vzduchu měřit několika teploměrnými sondami. Ty jsou umístěné na různých místech kolem stroje v polovině jeho výšky a ve vzdálenosti 1 až 2 m od něj. Pro každou sondu platí, že musí být chráněna před průvanem a vyzařovaným teplem.

Izolačním systémům, které se používají ve strojích, musí být také přiřazena tepelná třída podle IEC 60085. [12]

Maximální a minimální teplota okolního vzduchu:

Podle normy ČSN EN 60034 se stanovují maximální a minimální teploty okolního vzduchu, které jsou nutné pro správnou funkci měřeného stroje. Teplota okolního vzduchu nesmí v maximální hodnotě překročit 40 °C a minimální teplota okolního vzduchu nesmí být menší než -15 °C. Výjimka nastává v případě, pokud jmenovitý výkon stroje je vyšší než 3300 kW, nižší než 600 W, obsahuje komutátor, kluzné ložisko, nebo má vodu jako primární nebo sekundární chladivo. V tom případě nesmí minimální teplota okolního vzduchu být nižší než 0 °C. [12]

Metody měření teploty:

Pro měření teploty vinutí a jiných částí elektrického stroje se využívají všeobecně tři metody:

Odporová metoda – Teplota vinutí se určí z přírůstku odporu vinutí

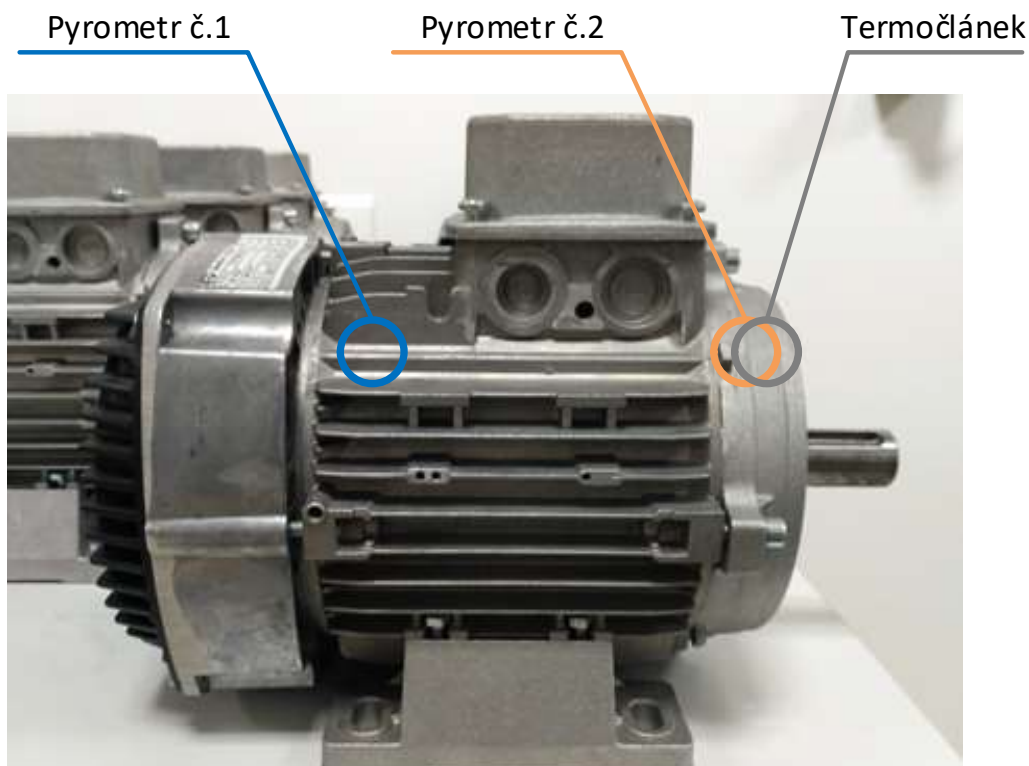
Metoda vložené teploměrné sondy (ETD) – Teplota se určí pomocí teploměrných sond (odporových, termočlánků nebo polovodičových sond), které jsou během výroby vestavěny v místech nepřístupných po dohotovení stroje

Teploměrová metoda – Teplotu stroje stanovíme teploměry přikládány k plochám přístupným po dohotovení stroje. Termín „Teploměr“ zahrnuje nejen teploměry dilatační, ale také odporové teploměry a termočlánky.

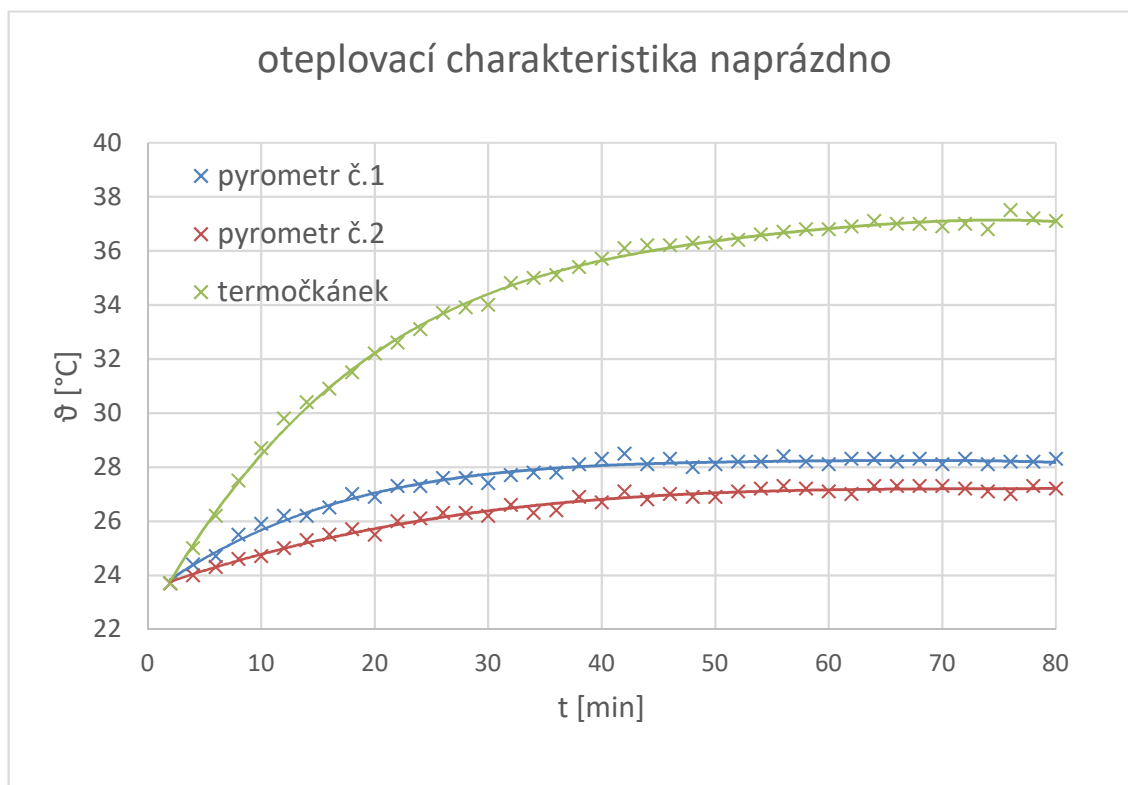
Ustálená teplota je stav, kterého je dosaženo, jestliže se oteplení několika částí stroje nemění o více než 2 K za hodinu. Pro vzájemnou kontrolu se různé metody nesmějí používat. [13]

8.2 Provedení oteplovací zkoušky naprázdno

Oteplovací zkouška asynchronního motoru naprázdno byla provedena v laboratoři FEKT VUT. Měřený stroj, připojen na síťové napětí byl v provozu bez zatížení. Do doby dosažení ustáleného oteplení byla teplota odečítána v intervalech dvou minut na předem stanovených místech viz Obr. 8.2. Jako měřicí přístroje byl použit termočlánek, pyrometr a termokamera.



Obr. 8.2 - Určení měřicích míst na motoru



Obr. 8.3 - Oteplovací charakteristika naprázdno

Jak lze vidět v grafu na Obr. 8.3, při měření vzniká velká chyba měření mezi hodnotami naměřenými termočlánekem a pyrometrem. Tato chyba je dána především nastavením chybným nastavením pyrometru, metodou měření a odečítáním hodnot. Proto budeme za referenční hodnotu teploty považovat hodnotu naměřenou termočlánekem.

Majoritní chybou je zde nastavení emisivity pyrometru, která byla nastavena na hodnotu $\varepsilon=0,95$, vzhledem k materiálu kostry motoru, která je z litiny a má podle tabulkových hodnot emisivitu $\varepsilon=0,3$. Správná metoda měření s pyrometrem spočívá v měření ve vzdálenosti 20 cm a kolmo k povrchu objektu. Protože je kostra motoru tvořena chladícím žebrováním a válcovým povrchem, bylo dodržení těchto podmínek obtížně dosažitelné.

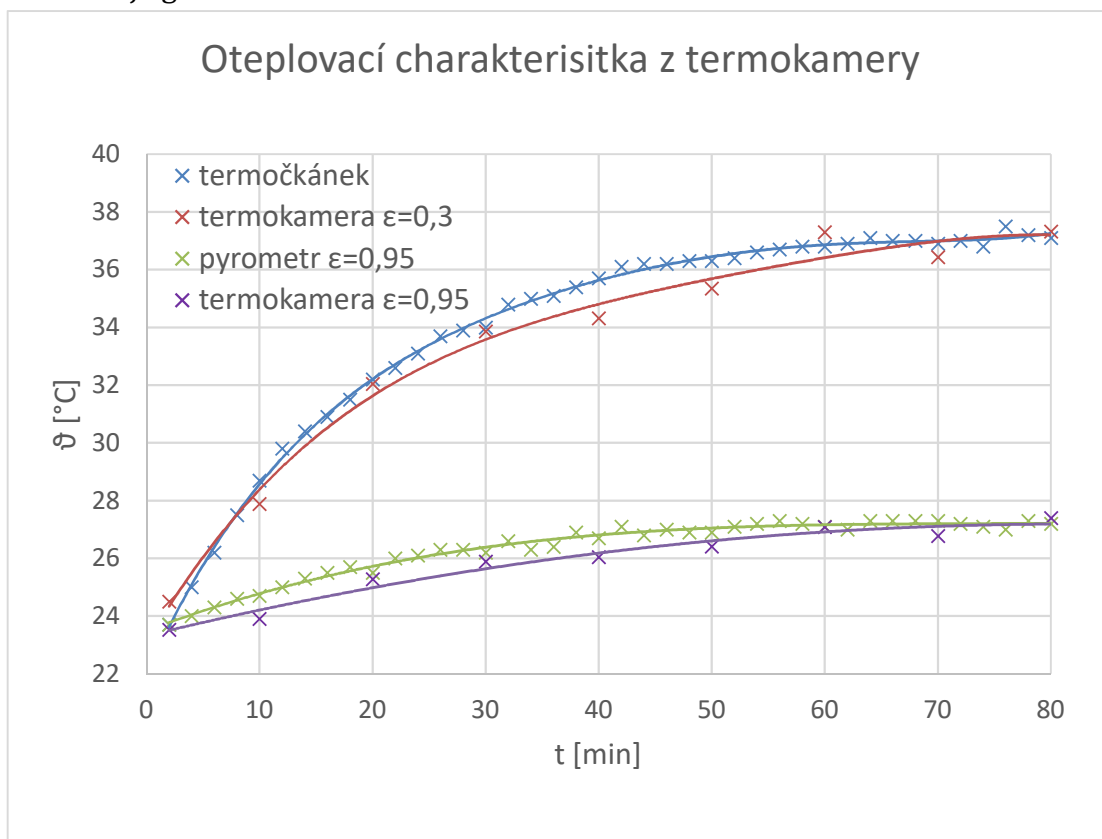
V tabulce Tab. 8.1 můžeme vidět ustálené hodnoty oteplení naměřené všemi přístroji.

Tab. 8.1 - Hodnoty ustáleného oteplení naprázdno

	pyrometr č.1	pyrometr č.2	termočlánek	termokamera $\varepsilon=0,3$	termokamera $\varepsilon=0,95$
θ [°C]	28,3	27,2	37,1	37,32	27,4

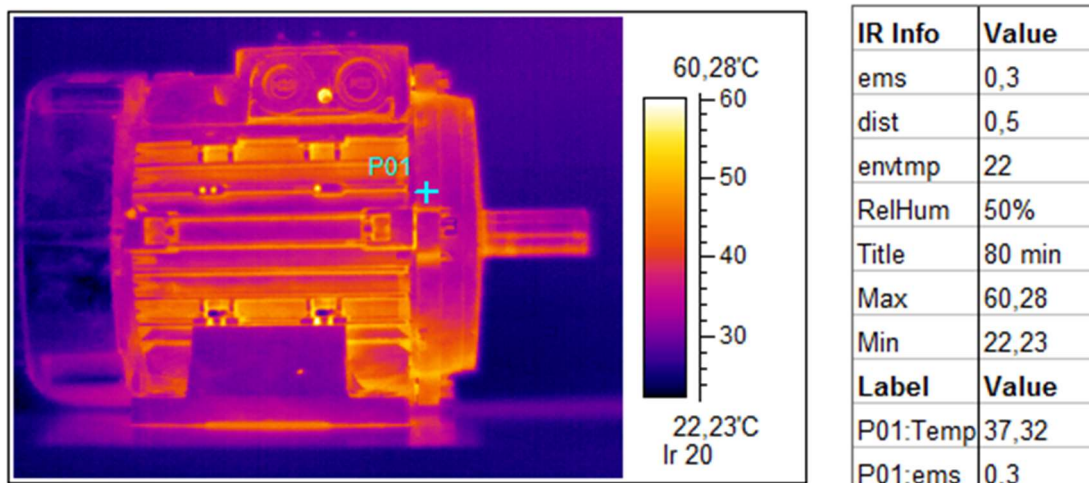
Měření termokamerou spočívalo v pořizování snímků každých 10 minut až do doby dosažení ustáleného oteplení. Jelikož se hodnoty ze snímků termokamery vyhodnocovaly až dodatečně po provedení měření, můžeme si ve vyhodnocovacím programu nastavit hodnotu emisivity, vzdálenost od stroje, teplotu a vlhkost okolního vzduchu. Všechny tyto parametry určují rozhas a velikosti teplot motoru.

Protože si můžeme ve vyhodnocovacím programu nastavit i emisivitu materiálu, byly výsledky z termokamery porovnány jak s měřením termočlánku (referenční), tak s měřením pyrometru. Hodnoty teploty byly ze snímků odečítány v místě, kde byla teplota měřena termočlánkem i pyrometrem. Výsledkem tohoto porovnání je graf na Obr. 8.4

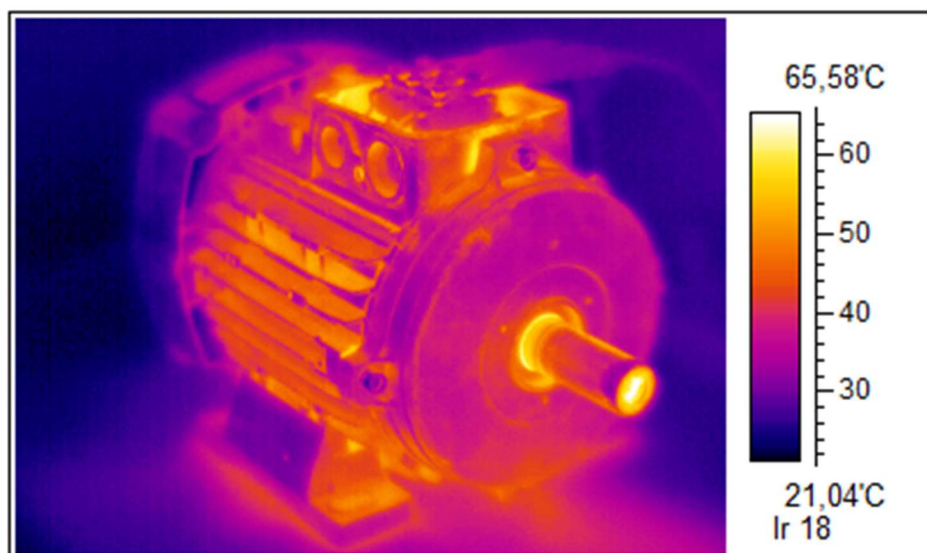


Obr. 8.4 - Porovnání hodnot naměřených termokamerou, termočlánkem a pyrometrem

Jak je z porovnání hodnot vidět, hodnoty pořízené termokamerou se téměř rovnají těm, které byly naměřeny referenčním termočlánkem i pyrometrem. Také je zde vidět velké zatížení chybou, která odpovídá nastavení bodu pro odečítání hodnot z obrázku termokamery. Příklad odečítání hodnot můžeme vidět na Obr. 8.6 s tabulkou popisující parametry fotografie a bodu určeného pro měření teploty. Fotografie níže na Obr. 8.6 a Obr. 8.5 byla pořízena při ustáleném oteplení stroje v čase 80 minut.



Obr. 8.6 - Odečítání teploty z termokamery

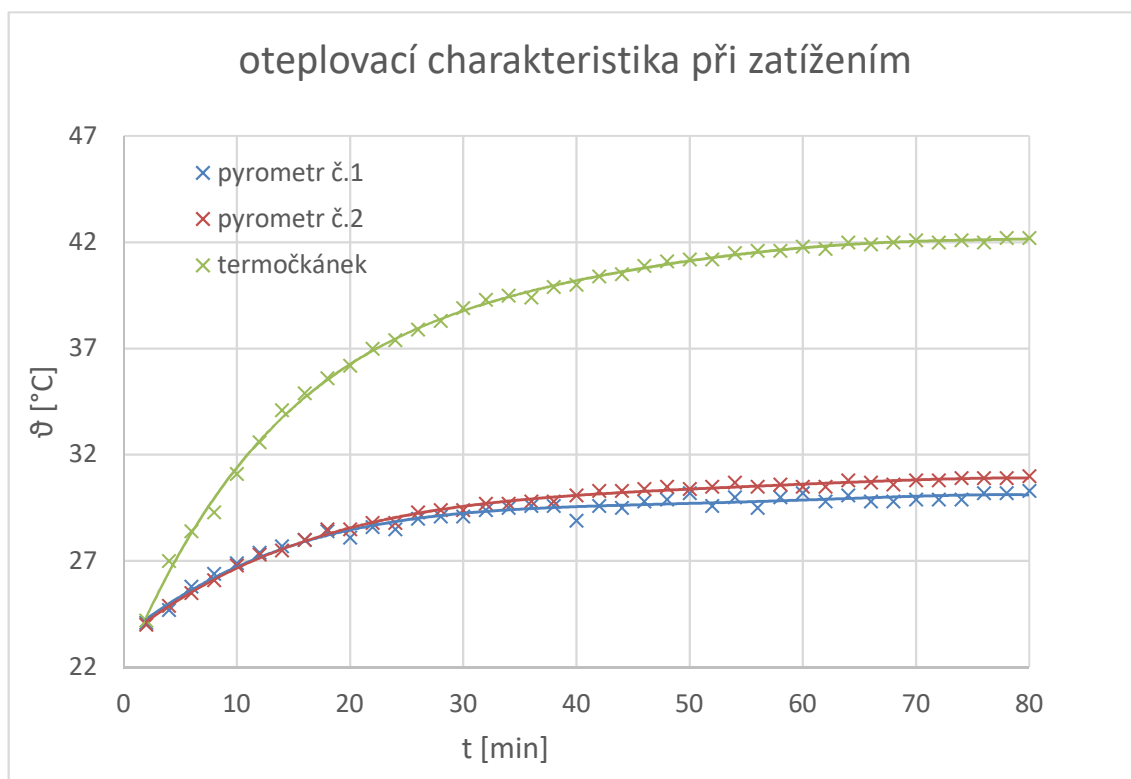


Obr. 8.5 - Fotografie termokamerou při zkoušce naprázdno

8.3 Provedení oteplovací zkoušky při jmenovitém zatížení

Oteplovací zkouška motoru při jmenovitém zatížení byla prováděna při zatížení 5 Nm. Hodnota zatížení byla nastavena na dynamometru spojeným s měřeným motorem. Stejně jak u měření naprázdno byly hodnoty odečítány pomocí pyrometru a termočlánku v intervalech dvou minut. Bohužel u tohoto měření nebyla použita termokamera vzhledem k nenadálým technickým problémům způsobující její nefunkčnost. Hodnoty teploty byly snímány na stejných místech jako u zkoušky naprázdno viz Obr. 8.2.

Na Obr. 8.7 můžeme pozorovat oteplovací charakteristiku asynchronního motoru, kde stejně jako u měření naprázdno, můžeme hodnoty teploty naměřené termočlánkem, můžeme považovat za referenční.



Obr. 8.7 - Oteplovací charakteristika při zatížení

V Tab. 8.2 můžeme pozorovat ustálené hodnoty teploty motoru zatíženým momentem 5 Nm.

Tab. 8.2 - Hodnoty ustáleného oteplení se zatížením

	pyrometr č.1	pyrometr č.2	termočlánek	termokamera
θ [°C]	30,3	31	42,2	-

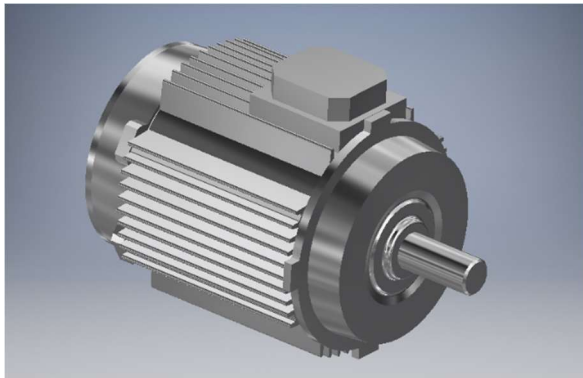
9. TVORBA MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Model řešeného motoru byl vytvořen v programu Autodesk Inventor, kde byly vymodelovány všechny dílčí části asynchronního motoru a následně sestaveny v jeden celek. Tento model je následně naimportován do programu ANSYS Workbench, kde byla provedena simulace statické teplotní analýzy při zatížení stroje.

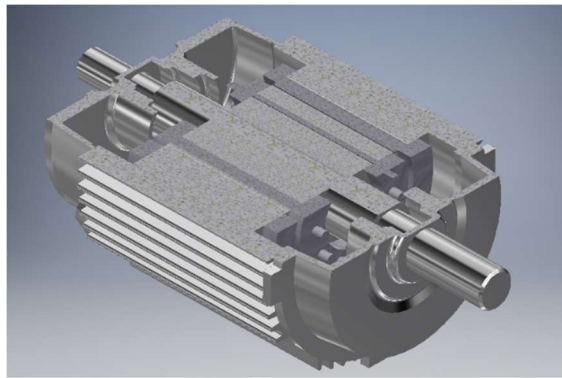
9.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor umožňuje parametrické 3D navrhování, tvorbu 2D výkresové dokumentace či správu konstrukčních dat. Inventor je momentálně jedním z nejlepších celosvětově používaných CAD systémů pro konstrukci 3D modelů ve strojírenství. Pro své možnosti aplikace a mnoho prvků využitelnosti jsem se rozhodl pro použití tohoto programu k vytvoření modelu.

Podle výkresové dokumentace byla vytvořená sestava částí modelu měřeného asynchronního motoru, jak můžeme vidět na Obr. 9.2 a Obr. 9.1. Tento model slouží jako výchozí bod pro další výpočty teplotní analýzy ať už metodou konečných prvků, či numerickými postupy.



Obr. 9.2 - Model asynchronního motoru



Obr. 9.1 - Řez modelem

9.2 Tepelná analýza motoru metodou konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je jednou z novějších možností, jak provést tepelnou analýzu. Avšak při používání MKP se stále setkáváme s částečným zjednodušením analyzovaného objektu, a proto je zapotřebí výsledky analýzy dále porovnat s numerickými, či naměřenými výsledky.

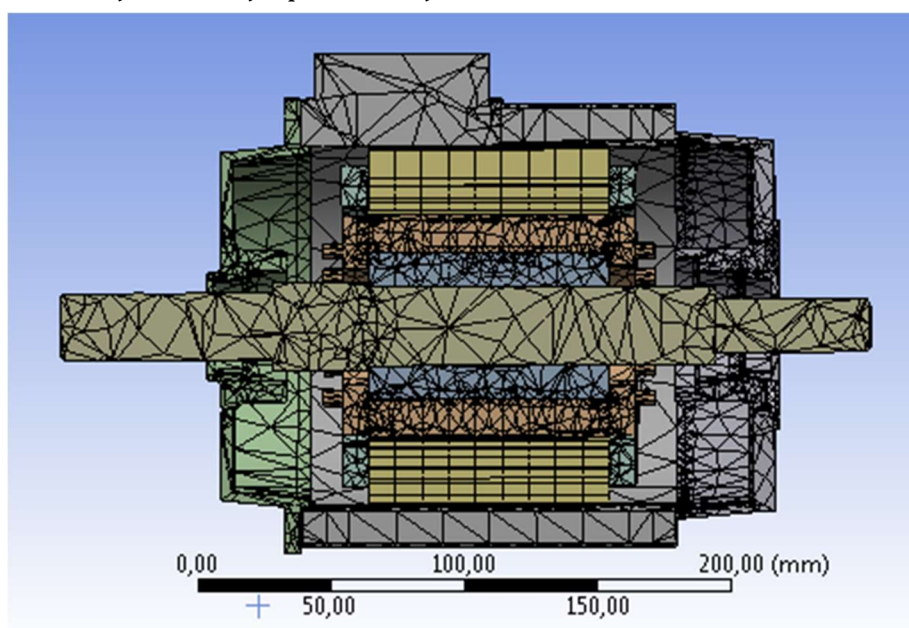
Využití MKP nabízí jako hlavní výhody možnosti řešení 2D a 3D úloh, jednoduché nastavování vstupních parametrů, zatížení modelu, materiálových

vlastností či okrajových podmínek. Velkou výhodou je také jednoduchá příprava modelu, jež lze naimportovat z běžně dostupných CAD softwarů. [9]

Při tvorbě modelu asynchronního motoru, byly účelně jednotlivé části zjednodušeny. Tato zjednodušení se týkají zejména malých zaoblených částí motoru (šrouby, ložiska, svorkovnice), jež by celkovou simulaci výrazně prodloužili, aniž by měly větší vliv na simulované fyzikální pole.

Měření asynchronní motor byl podroben analýze pomocí metody konečných prvků v prostředí programu ANSYS Workbench. V tomto prostředí byl pro statickou tepelnou analýzu vybrán blok Steady-State Thermal.

Při této analýze bylo zohledněno šíření tepla vedením v pevných částech motoru i v objemu stroje, představující vnitřní vzduch.

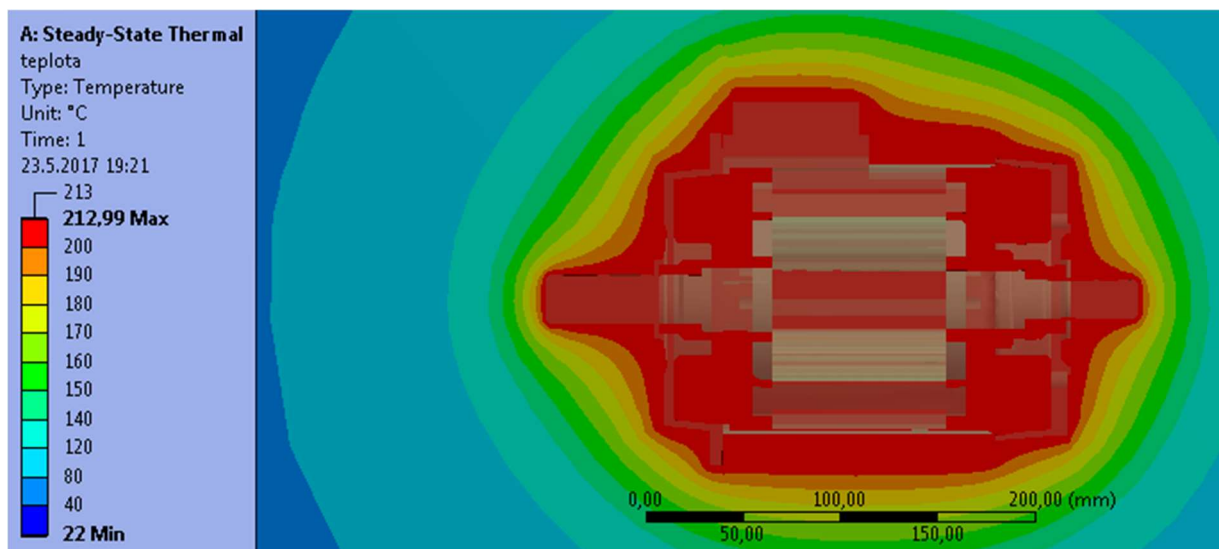


Obr. 9.3 - Nastavení sítě MKP

Na Obr. 9.3 vidíme nastavení sítě pro výpočet tepelné sítě pomocí metody konečných prvků. Tento obrázek je v řezu motoru kde tato síť představuje možné izotermy simulace.

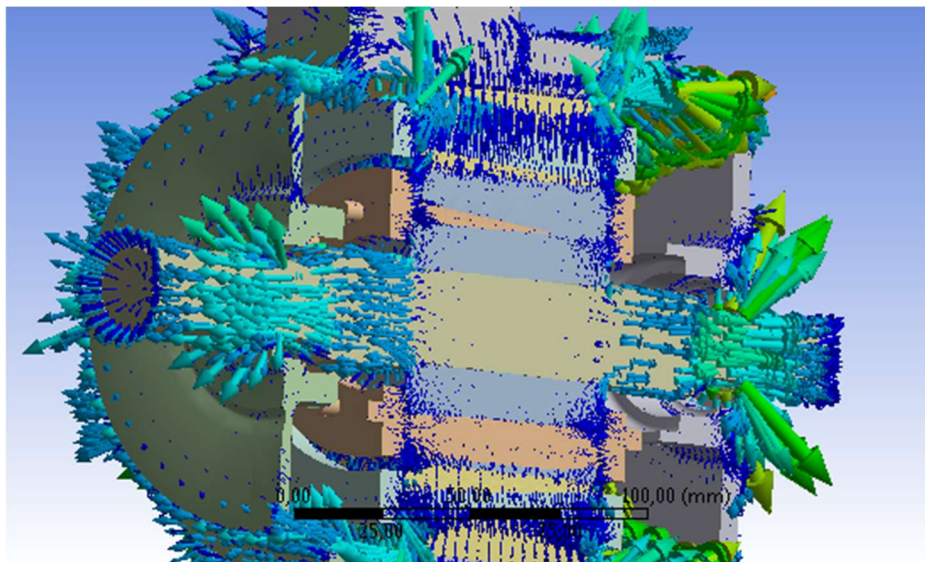
Nastavení ztrát v simulovaném asynchronním motoru bylo provedeno pro statorové vinutí (85 W) a pro klec rotoru (35 W). Jako okrajové podmínky byly určeny vnější plochy kvádrů vzdáleny 1 m na všechny strany od simulovaného motoru. Tyto plochy jsou nastaveny na pevnou hodnotu teploty okolního vzduchu (22 °C).

Po provedení simulace byla zjištěna teplota částí stroje a okolního vzduchu viz Obr. 9.4 a taktéž směr a intenzita teplotního toku motorem viz Obr. 9.5.



Obr. 9.4 - Teplotní simulace motoru

Jak můžeme vidět, nejteplejším místem motoru je právě konstrukční část rotoru s klecí a také paket statoru s trojfázovým vinutím (213 °C). Jelikož se jedná o malý motor o výkonu 750 W s uzavřeným chlazením, je předpokládáno, že celý motor bude mít v poměrně krátkém čase stejnou teplotu ve všech částech a dále dochází k předávání tepla do okolního vzduchu pouze sáláním.

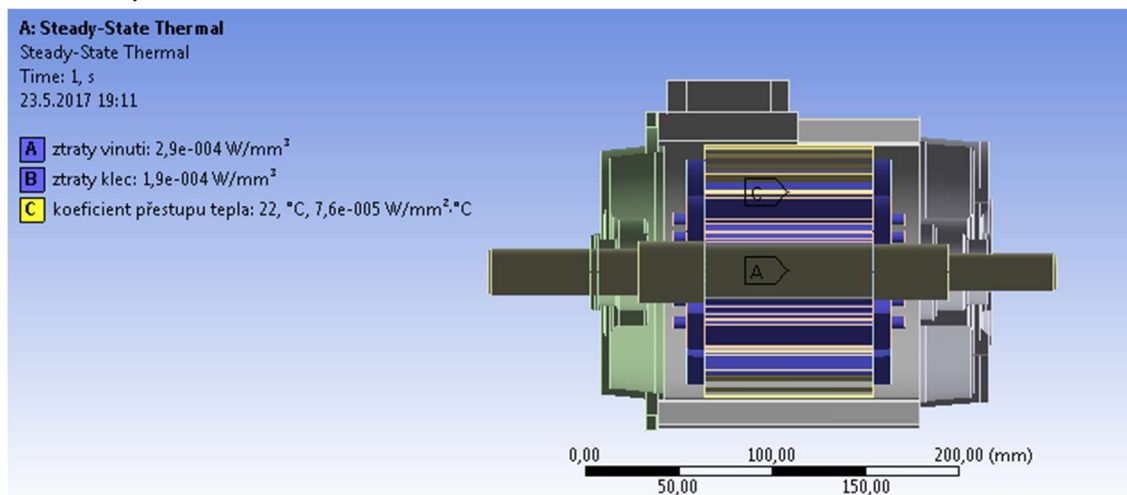


Obr. 9.5 - Zobrazení tepelného toku motorem

Tato analýza metodou konečných prvků nesouhlasí s hodnotami teplot naměřených. Tento fakt je dán skutečností, že reálný motor má na hřídeli připevněný ventilátor, který chladí celý motor, aby nedošlo k poškození izolace, nebo k poškození stroje vlivem mezizávitových zkratů ve statorovém vinutí.

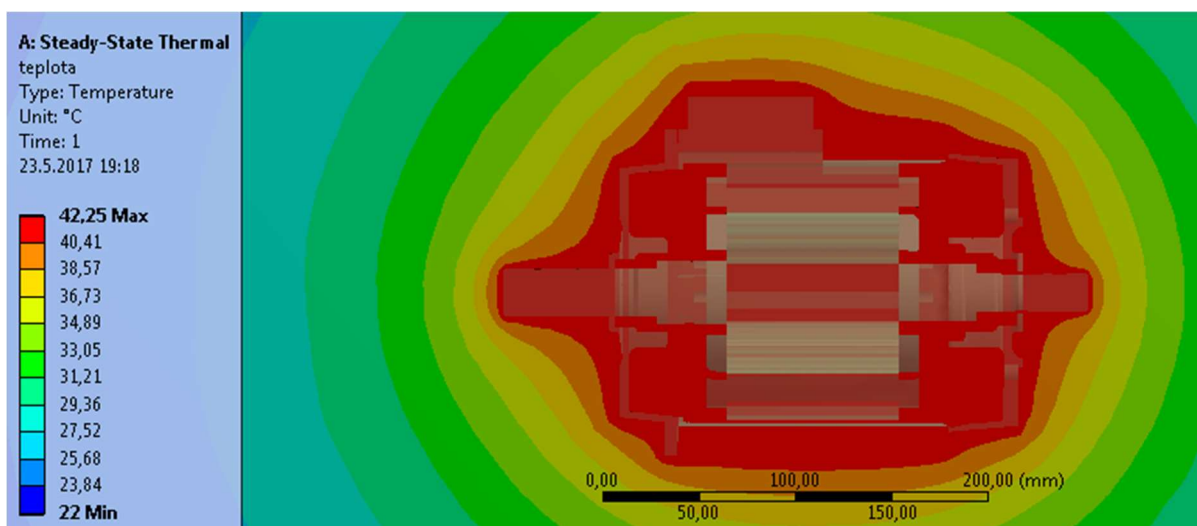
Aby byla tato chyba v analytickém modelu eliminována, byla experimentálně zjištěna hodnota emisivity, která se nastavila na všechny plochy ofoukávané ventilátorem uvnitř modelu. K těmto částem stroje patří zejména rotorový svazek, rotorová klec s kruhy a statorový paket s budícím vinutím viz Obr. 9.6.

Po nastavení hodnoty koeficient přestupu tepla $\alpha_0 = 7,6 \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ byla podrobena analýza stroje opakovanému výpočtu. Hodnota tohoto součinitele byla postupně měněna, dokud nebylo dosaženo podobných výsledků, jako při měření ztrát stroje.



Obr. 9.6 - nastavení simulace s chlazením

Na Obr. 9.7 je vidět hodnoty teploty uvnitř a kolem motoru s uvážením vnitřního chlazení a ofukování ventilátorem.

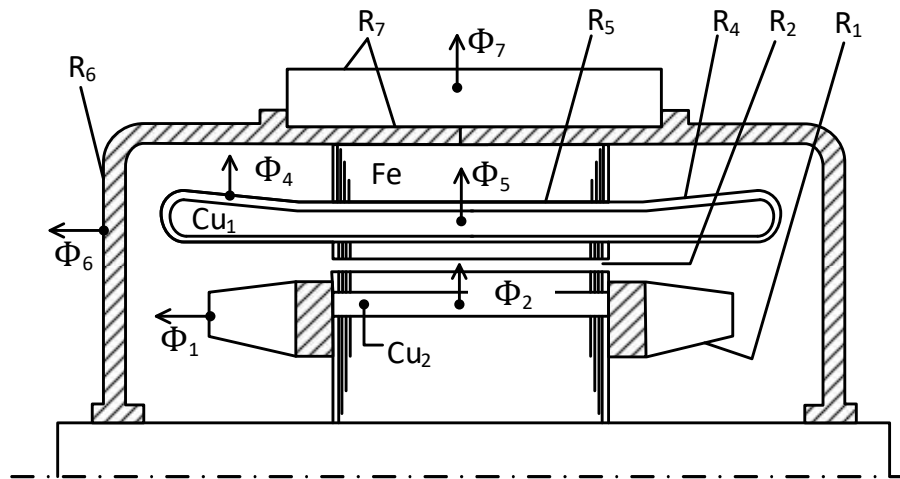


9.3 Numerický výpočet oteplení asynchronního motoru

Jak již bylo dříve řečeno, měřený motor spadá do kategorie zavřených strojů. V tomto případě není zapotřebí počítat složitější výpočty oteplení s proudem chladicího vzduchu podél částí, kde vznikají ztráty.

Na Obr. 9.8 je naznačeno proudění tepla motoru s žebrovou kostrou kde vidíme všechny tepelné odpory a toky směrem k okolnímu prostředí.

Tepelný proud Φ_1 odevzdává ztrátové teplo povrchem kruhů rotorové klece vnitřnímu vzduchu a dále proudem Φ_6 skrze chladicí povrch štítů motoru předává teplo chladicímu vzduchu. Jinou tepelnou cestou prochází proud Φ_2 , který teče z rotorové klece přes vzduchovou mezeru do statoru, odkud směřuje k chladicím plochám kostry motoru. Joulové ztráty ve statorovém vinutí P_{Cu1} se mohou šířit buď přes drážkovou izolaci do železa statoru (Φ_5), nebo chladicím povrchem čel vinutí do vnitřního vzduchu motoru (Φ_4). [15]



Obr. 9.8 - Proudění tepla uzavřeným motorem [15]

Na Obr. 9.9 je zobrazeno náhradní schéma sestaveno z tepelných odporů a zdrojů ztrát podle Obr. 9.8. Toto schéma je dále zpracováno pro výpočet oteplení železa statoru, oteplení mědi statoru a klece rotoru.

Pro řešení tohoto náhradního schématu viz Obr. 9.9 jsou sestaveny tyto proudové rovnice:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = P_{Cu2} \quad (9.1)$$

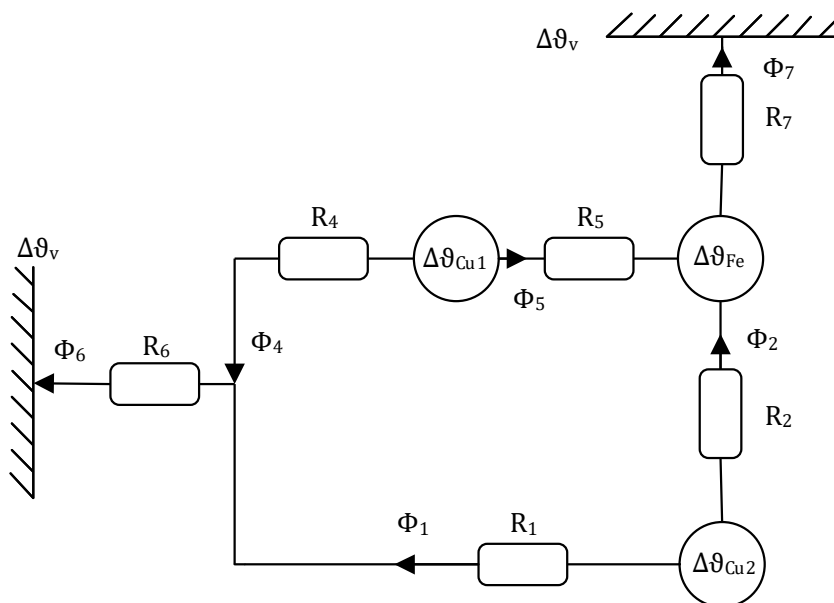
$$\Phi_4 + \Phi_5 = P_{Cu1} \quad (9.2)$$

$$\Phi_6 + \Phi_7 = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} \quad (9.3)$$

$$\Phi_7 = \Phi_2 + \Phi_5 + P_{Fe} \quad (9.4)$$

$$\Phi_6 = \Phi_1 + \Phi_4 \quad (9.5)$$

Včetně těchto rovnic platí také podmínka, která popisuje oteplení jakékoli části stroje stejnou hodnotou, ať je spočítána kteroukoli tepelnou cestou. [15]



Obr. 9.9 - Náhradní schéma tepelného obvodu motoru [15]

Podle náhradního schématu platí také následující rovnice:

$$\Delta\theta_{Cu1} = R_4 \cdot \Phi_4 + R_6 \cdot \Phi_6 = R_5 \cdot \Phi_5 + R_7 \cdot \Phi_7 \quad (9.6)$$

$$\Delta\theta_{Cu2} = R_1 \cdot \Phi_1 + R_6 \cdot \Phi_6 = R_2 \cdot \Phi_2 + R_7 \cdot \Phi_7 \quad (9.7)$$

Rovnice můžou být zjednodušeny vytvořením pomocných konstant:

$$A = R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (9.8)$$

$$B = R_6 + R_7 \quad (9.9)$$

$$C = R_1 + R_2 + R_6 + R_7 \quad (9.10)$$

$$D = R_2 \cdot P_{Cu2} + R_7 \cdot (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe}) \quad (9.11)$$

$$E = R_5 \cdot P_{Cu1} + R_7 \cdot (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe}) \quad (9.12)$$

Vyřešením soustavy sedmi rovnic ze vzorců (9.1) až (9.7) dostaneme vzorce pro výpočet tepelných proudů:

$$\Phi_1 = \frac{A \cdot D - B \cdot E}{A \cdot C - B^2} \quad (9.13)$$

$$\Phi_4 = \frac{E}{A} - \Phi_1 \cdot \frac{B}{A} \quad (9.14)$$

Pro výpočet jednotlivých tepelných odporů podle schématu na Obr. 9.9 náhradního schématu platí:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_i \cdot S_{C2}} = \frac{1}{25 \cdot 0,09} = 4,44 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (9.15)$$

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda_v \cdot S_\delta} = \frac{0,001}{0,027 \cdot 0,00031} = 119,47 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (9.16)$$

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_i \cdot S_{C1}} = \frac{1}{25 \cdot 0,0233} = \mathbf{1,72 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.17)$$

$$R_5 = \frac{l_i}{\lambda_i \cdot S_d} = \frac{0,001}{0,17 \cdot 0,096} = \mathbf{0,06 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.18)$$

$$R_6 = \frac{1}{\alpha_i \cdot S_{Si}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_{Se}} = \frac{1}{25 \cdot 0,0474} + \frac{1}{56 \cdot 0,0571} = \mathbf{1,16 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.19)$$

$$R_7 = \frac{m}{\lambda_v \cdot S_m} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_k} = \frac{0,0001}{0,027 \cdot 0,0064} + \frac{1}{56 \cdot 0,223} = \mathbf{0,66 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.20)$$

Dosazením vypočtených tepelných odporů do rovnic (9.8) až (9.12) dostaneme hodnoty pomocných konstant:

$$A = R_4 + R_5 + R_6 + R_7 = 1,72 + 0,06 + 1,16 + 0,66 = \mathbf{3,59 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.21)$$

$$B = R_6 + R_7 = 1,16 + 0,66 = \mathbf{1,82 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.22)$$

$$C = R_1 + R_2 + R_6 + R_7 = 4,44 + 119,47 + 1,16 + 0,66 = \mathbf{125,73 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.23)$$

$$D = R_2 \cdot P_{Cu2} + R_7 \cdot (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe}) = 119,47 \cdot 35 + 0,66 \cdot (85 + 35 + 35) = \mathbf{4283,71 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.24)$$

$$E = R_5 \cdot P_{Cu1} + R_7 \cdot (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe}) = 0,06 \cdot 85 + 0,66 \cdot (85 + 35 + 35) = \mathbf{107,32 \text{ } ^\circ\text{C/W}} \quad (9.25)$$

Z rovnic (9.13) a (9.14) nyní může být spočten tepelný proud P_1 a P_4 :

$$P_1 = \frac{A \cdot D - B \cdot E}{A \cdot C - B^2} = \frac{3,59 \cdot 4283,71 - 1,82 \cdot 107,32}{3,59 \cdot 125,73 - 1,82^2} = \mathbf{33,88 \text{ W}} \quad (9.26)$$

$$P_4 = \frac{E}{A} - P_1 \cdot \frac{B}{A} = \frac{107,32}{3,59} - 33,88 \cdot \frac{1,82}{3,59} = \mathbf{12,75 \text{ W}} \quad (9.27)$$

Podle základních rovnic jsou vypočteny hodnoty ostatních tepelných proudů:

$$\Phi_2 = P_{Cu2} - \Phi_1 = 35 - 33,88 = \mathbf{1,11\ W} \quad (9.28)$$

$$\Phi_5 = P_{Cu1} - \Phi_4 = 85 - 12,75 = \mathbf{72,25\ W} \quad (9.29)$$

$$\Phi_6 = \Phi_1 + \Phi_4 = 33,88 - 12,75 = \mathbf{46,63\ W} \quad (9.30)$$

$$\begin{aligned} \Phi_7 &= P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} - \Phi_6 = 85 + 35 + 35 - 46,63 \\ &= \mathbf{107,82\ W} \end{aligned} \quad (9.31)$$

Nyní je možné spočítat oteplení jednotlivých částí motoru podle [15].

Oteplení železa statoru:

$$\Delta\vartheta_{Fe} = R_7 \cdot \Phi_7 + \Delta\vartheta_v = 0,66 \cdot 107,82 + 12 = \mathbf{83,39\ ^\circ C} \quad (9.32)$$

Oteplení mědi ve vinutí statoru:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Cu1} &= \Delta\vartheta_{Fe} + R_5 \cdot \Phi_5 = 83,39 + 0,06 \cdot 72,25 \\ &= \mathbf{87,82\ ^\circ C} \end{aligned} \quad (9.33)$$

Oteplení klece rotoru:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Cu2} &= \Delta\vartheta_{Fe} + R_2 \cdot \Phi_2 = 83,39 + 119,47 \cdot 1,11 \\ &= \mathbf{216,54\ ^\circ C} \end{aligned} \quad (9.34)$$

Oteplení vzduchu uvnitř motoru:

$$\Delta\vartheta_{vi} = \Delta\vartheta_v + R_6 \cdot \Phi_6 = 12 + 1,16 \cdot 46,63 = \mathbf{65,93\ ^\circ C} \quad (9.35)$$

Z těchto výpočtů můžeme vidět, že do vnitřního vzduchu přechází ze ztrát klece rotoru 33,88 W a pouze 1,11 W prochází vzduchovou mezerou do železa statoru. Čely statorového vinutí prochází ze ztrát do vnitřního vzduchu 12,75 W a do plechů statoru prochází 72,25 W. [15]

Podle výpočtů dle [16] se však předpokládá, že ztráty v mědi rotoru odvedou do okolního prostředí štíty motoru a ztráty v mědi a železe statoru odvede kostra s žebrováním. Za tohoto předpokladu bychom dostali oteplení železa:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Fe} &= R_7 \cdot (P_{Fe} + P_{Cu1}) + \Delta\vartheta_v = 0,66 \cdot (35 + 85) + 12 \\ &= \mathbf{91,05\ ^\circ C} \end{aligned} \quad (9.36)$$

Oteplení mědi statoru:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Cu1} &= \Delta\vartheta_{Fe} + R_5 \cdot P_{Cu1} = 91,05 + 0,06 \cdot 85 \\ &= \mathbf{96,26\ ^\circ C} \end{aligned} \quad (9.37)$$

Oteplení klece rotoru:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{Cu2} &= \Delta\vartheta_v + P_{Cu2} \cdot (R_1 + R_6) \\ &= 12 + 35 \cdot (4,44 + 1,16) = \mathbf{208,04\ ^\circ C} \end{aligned} \quad (9.38)$$

Řešení rovnice tepelné rovnováhy:

Pomocí rovnice tepelné rovnováhy (9.39) můžeme vypočítat okamžité hodnoty oteplení a logaritmický tvar oteplovací charakteristiky.

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\alpha_0 \cdot A}{c \cdot V} t} \right] = \Delta\vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (9.39)$$

Pro výpočet okamžitého oteplení můžeme použít odvozenou rovnici pro výpočet okamžitého oteplení. Časová konstanta τ udává hodnotu oteplení, za podmínek nulového odvodu tepla do chladícího okolí. Tuto hodnotu časové konstanty můžeme určit z grafu naměřených hodnot jako 0,632 maximální ustálené hodnoty oteplení, viz (7.42).

$$\Delta\vartheta_v = \Delta\vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot \vartheta_{max} \quad (9.40)$$

Hodnotu okamžitého oteplení pak popisuje vzorec:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (9.41)$$

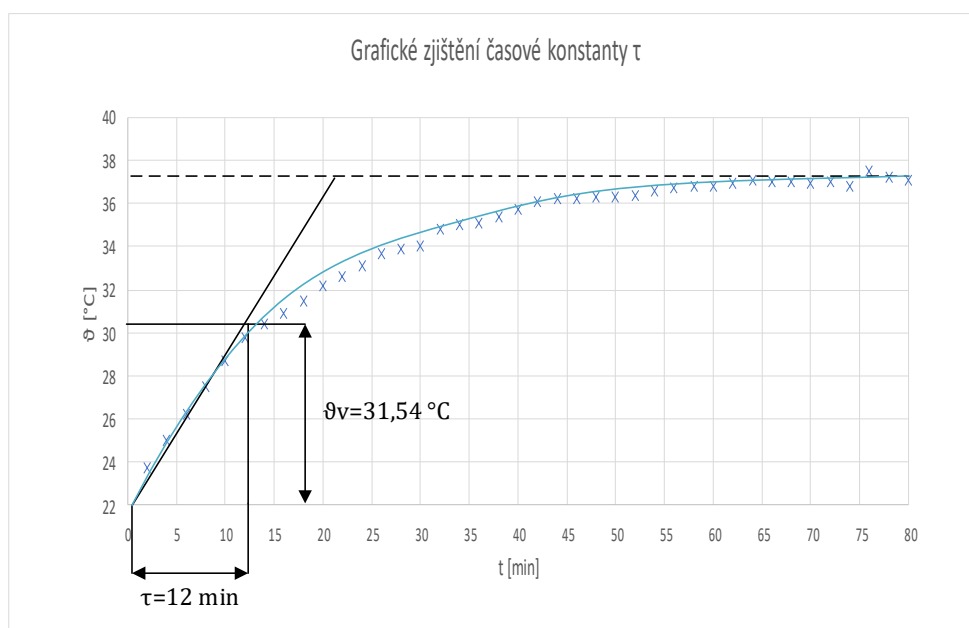
Jako příklad si níže uvedeme výpočet oteplovací charakteristiky z okamžitých hodnot naměřených při zkoušce naprázdno. Výsledky vypočteného okamžitého oteplení budou zobrazeny pouze v následující kapitole ve zhodnocení a porovnání výsledků.

Výpočet oteplovací charakteristiky ze zkoušky naprázdno:

Pro výpočet hodnot okamžitého oteplení a grafického zjištění časové konstanty τ budeme uvažovat pouze průběh z naměřených hodnot termočládku. Jako ustálená teplota při zatížení naprázdno byla naměřena hodnot $\Delta\vartheta_{max} = 37,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Grafické zjištění hodnoty časové konstanty lze vidět na Obr. 9.10.

$$\begin{aligned} \vartheta_v &= 0,632 \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_0) + \vartheta_0 \\ &= 0,632 \cdot (37,1 - 22) + 22 = \mathbf{31,54 \text{ } ^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (9.42)$$

Po proložení charakteristiky tečnou a odečtení času při teplotě ϑ_v jsme zjistili, že časová konstanta má hodnotu $\tau = 12 \text{ min}$ viz Obr. 9.10

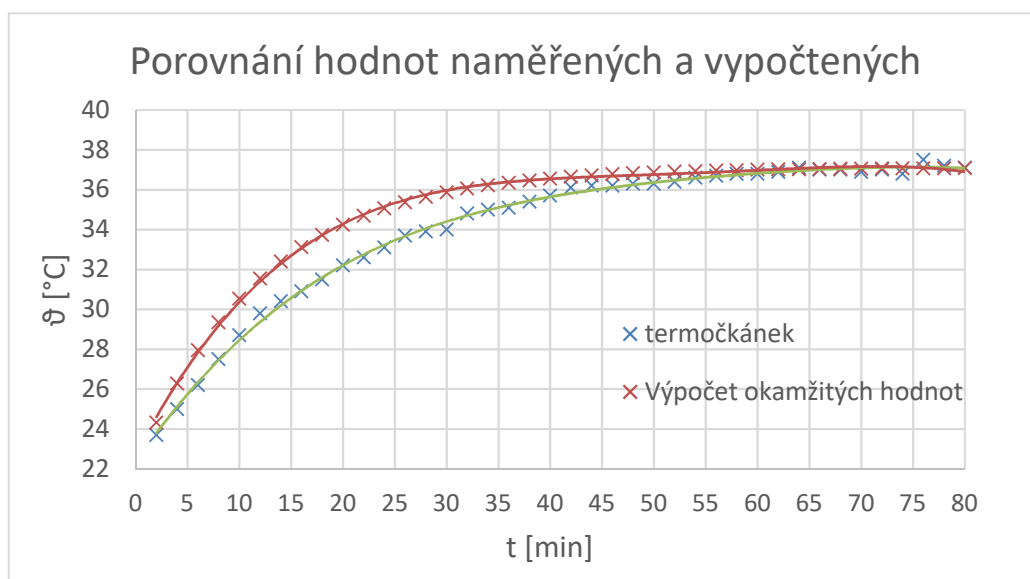


Obr. 9.10 - Grafické zjištění časové konstanty

Pro výpočet okamžitých hodnot byla sestavena následující rovnice:

$$\begin{aligned} \vartheta &= (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \vartheta_0 & (9.43) \\ &= (37,1 - 22) \cdot \left(1 - e^{-\frac{2}{12}}\right) + 22 \\ &= \mathbf{24,32 \text{ } ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Porovnání naměřených hodnot termočlánekem a vypočítaných metodou okamžitého oteplení můžeme pozorovat v grafu na Obr. 9.11.



Obr. 9.11 - porovnání hodnot naměřených a vypočtených

10. ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

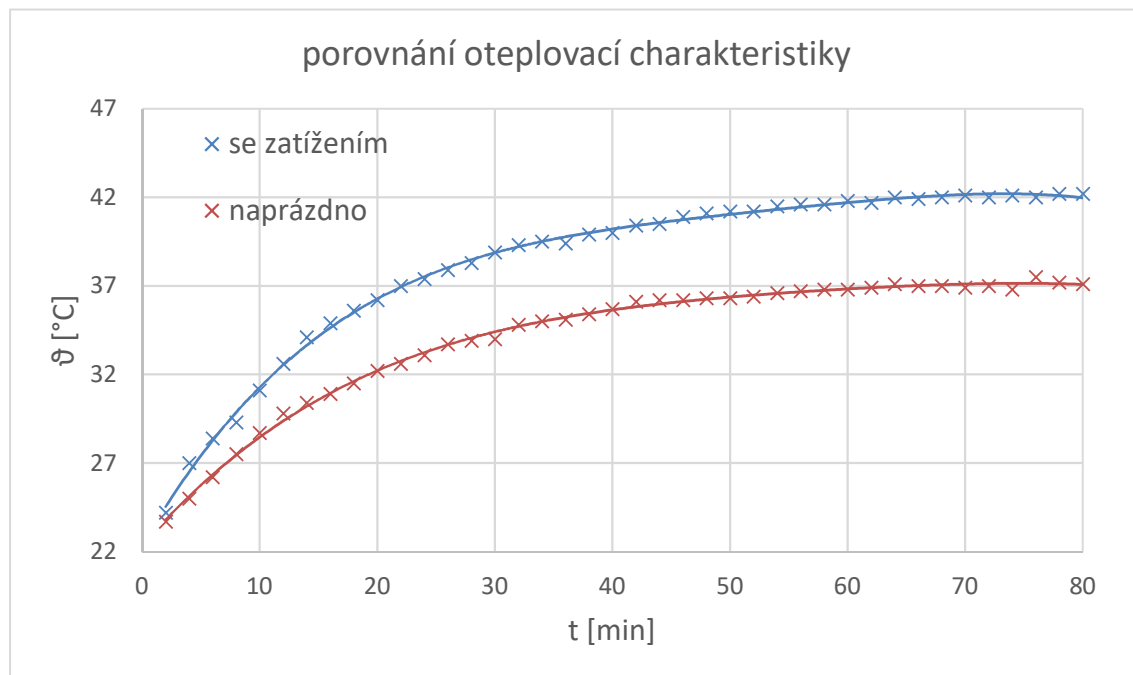
V této kapitole budou porovnány předpoklady, zda je možné pomocí výpočtů či analytického modelu dosáhnout výsledků naměřených při oteplovací zkoušce. Vzhledem ke ztrátám stroje, které způsobují oteplení celého zařízení, je žádané znát hodnotu ustáleného oteplení pro eliminaci možných chyb nebo zvýšení životnosti elektrického stroje.

Asynchronní motor podrobený zkoušce naprázdno a zkoušce při zatížení jmenovitým momentem 5 Nm byl sledován po dobu 80 minut, dokud nedošlo k ustálení teploty definované normou ČSN EN 60034-2-1. Výsledky měření jsou zapsány v tabulce.

Tab. 10.1 - Výsledky měření oteplení motoru

		pyrometr č. 1	pyrometr č.2	termočlánek	termokamera
$\Delta\theta$ [°C]	naprázdno	28,3	27,2	37,1	37,32
	se zatížením	30,3	31	42,2	-

Hodnoty byly odečítány na motoru pomocí pyrometru, termočlánu a termokamery. Určená místa pro odečítání hodnot teploty jsou zobrazeny na Obr. 8.2. Jako referenční hodnota byla uvažována teplota změřena termočlánekem. Rozdíl oteplovacích charakteristik naprázdno a se zatížením lze pozorovat na Obr. 10.1. Rozdíl mezi těmito teplotami v ustáleném stavu je 4,9 °C.



Obr. 10.1 - Porovnání oteplovacích charakteristik

Z měření ztrát v motoru byla vypočtena velikost ztrát ve vinutí statoru 85 W, ztráty v železe 35 W a ztráty v kleci rotoru také 35 W. Tyto ztráty byly zahrnuty do výpočtu oteplení první metodou podle Cigánka (Stavba elektrických strojů z [15]) (z rozměrů) a druhou metodou podle Alexejeva (Konstrukce elektrických strojů z [16]) (ze ztrát). Výsledky numerického výpočtu oteplení se nachází v Tab. 10.2

Tab. 10.2 – Výsledky vnitřního oteplení numerickým výpočtem

	Z rozměrů	Ze ztrát
$\Delta\vartheta_{Fe}$ [°C]	83,39	91,05
$\Delta\vartheta_{Cu1}$ [°C]	87,82	96,26
$\Delta\vartheta_{Cu2}$ [°C]	216,54	208,04
$\Delta\vartheta_{vi}$ [°C]	65,93	-

Jak je na první pohled zřejmé, tyto hodnoty ustáleného oteplení se zdaleka nerovnají výsledkům naměřeným. Tato chyba je způsobena zejména charakterem výpočtu, protože výpočty podle těchto metod nezahrnují v úvahu chlazení stroje vlivem ventilátoru přidělaném na hřídeli motoru. Můžeme se domnívat, že tyto hodnoty oteplení bychom také změřili po odmontování ventilátoru, avšak vzhledem k možnému destrukci stroje jsme tento případ reálně neměřili.

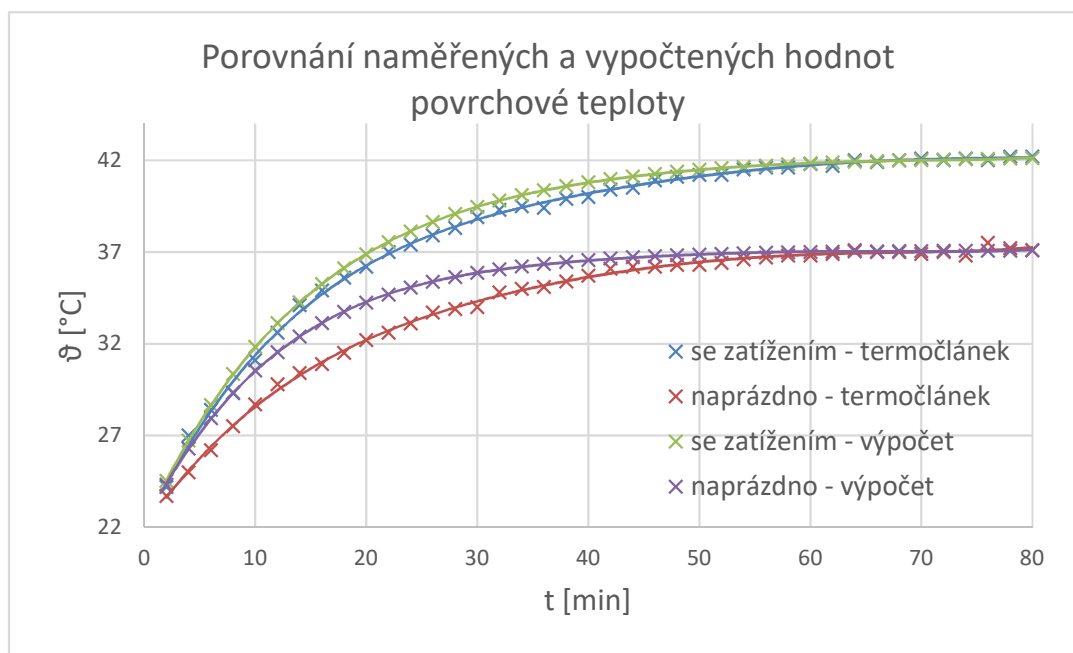
Rozdíl mezi použitými metodami je především v uvažování přestupu tepla z klece rotoru přes vzduchovou mezeru a dále přes plechy statoru a žebrování kostry do chladícího vzduchu. Jak můžeme pozorovat v hodnotách z metody 2 viz Tab. 10.2, teplota klece rotoru $\Delta\vartheta_{Cu2}$ se zmenšila o 8,5 °C, teplota železa statoru $\Delta\vartheta_{Fe}$ se zvýšila o 7,66 °C a taktéž teplota vinutí statoru $\Delta\vartheta_{Cu1}$ se zvýšila o 8,44 °C. Je obtížné říci, zda je přesnější metoda 1 nebo metoda 2, protože obě metody jsou založeny na ulehčujících okolnostech pro jednoduchý výpočet oteplení.

Obě metody výpočtů však pozorují vnitřní teploty stroje bez chlazení. Abychom výpočtem získali i reálné hodnoty povrchové teploty, byly sestaveny rovnice tepelné bilance pro výpočet okamžitých hodnot povrchu motoru. Porovnání hodnot naměřených a vypočtených můžeme vidět v grafu na Obr. 10.2.

Tento průběh oteplovací charakteristiky stroje je porovnán jak pro zkoušku bez zatížení, tak se zatížením jmenovitým momentem 5 Nm. Níže je v Tab. 10.3 vidět hodnoty ustáleného oteplení v čase 80 minut.

Tab. 10.3 - Tabulka naměřených a vypočtených hodnot povrchové teploty

	Teplota ϑ [°C]	
	naprázdno	se zatížením
termočlánek	37,1	42,2
výpočet	37,1	42,1



Obr. 10.2 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot povrchové teploty

Hodnoty získané ať už měřením nebo výpočtem jsou také porovnány s výsledky dosaženými analytickým modelem a simulací v programu ANSYS Workbench metodou konečných prvků. Pro zjednodušení byl tento model simulován na statickou tepelnou analýzu v ustáleném stavu bez zohlednění chlazení ventilátorem a prouděním vzduchu. Po nastavení okrajových podmínek a ztrát v konstrukčních částech stroje byla simulace spuštěna. Tato simulace nám dává náhled do tepelných polí stroje v grafickém podání viz Obr. 9.4 s vypovídající hodnotou oteplení stroje v ustáleném stavu, bez použití ventilátoru. Předpokladem této simulace je podoba výsledků s výpočty v Tab. 10.2. Reálný rozdíl, mezi těmito údaji je 3,55 °C (z rozměrů) a 4,95 °C (ze ztrát). Tyto rozdíly jsou dány přesností nastavení simulace a rozsahem zjednodušujících předpokladů u numerického výpočtu.

Pro dosažení hodnot odpovídajících naměřeným hodnotám teploty bylo využito nastavení koeficientu přestupu tepla všem plochám materiálů vnitřních částí stroje, které jsou ofukovány ventilátorem. Experimentálně byla zjištěna hodnota tohoto parametru, která byla pro nastavení další simulace stanovena jako $\alpha_0 = 7,6 \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ a nastavena všem ofukovaným plochám těchto konstrukčních částí.

Výsledkem této simulace byla hodnota teploty stroje 42,25 °C, což je rozdílná hodnota jen o 0,05 °C. Rozložení teplotního pole v tomto případě je možno vidět na

Obr. 9.7. Výsledné hodnoty získané pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench jsou zapsány v Tab. 10.4.

Tab. 10.4 - Výsledky oteplení pomocí MKP

	bez chlazení	s chlazením
ϑ [°C]	212,99	42,25

Pro porovnání výsledků slouží přehledná tabulka Tab. 10.5 zobrazující hodnoty teploty stroje získaných měření, numerickými výpočty tepelných sítí i simulacemi pomocí MKP. Zde je vidět, že i vzhledem k jednoduchosti výpočtů a simulace, je možné dojít k poměrně přesným výsledkům, navzájem se podporujících.

Tab. 10.5 - Přehled všech výsledků při zatížení 5 Nm

		Teplota ϑ [°C]	
		Bez chlazení	S chlazením
Měření	pyrometr č.1	-	30,3
	pyrometr č.2	-	31
	termočlánek	-	42,2
	termokamera	-	-
Výpočty	z rozměrů	216,54	-
	ze ztrát	208,04	-
	tepelná bilance	-	42,1
Simulace	MKP	212,99	42,25

11. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl výpočet rozložených teplotních polí v elektrickém stroji, konkrétně asynchronním motoru o výkonu 750 W. Práce má vyhodnotit použití různých metod sloužících ke zjištění oteplení motoru ať už na povrchu či vnitřních částí stroje, a to při chodu naprázdno bez zatížení a při jmenovitém zatížení 5 Nm.

V průběhu této práce byla provedena teplotní analýza asynchronního motoru pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench, která byla doplněna výpočty teplotních sítí podle dvou různých metod a podle rovnice tepelné bilance. Všechny tyto výsledky byly porovnány s reálným měřením oteplovací charakteristiky motoru, která byla provedena pomocí termočlánu, pyrometru a termokamery.

Při měření oteplovací charakteristiky bylo za referenční měřidlo určen termočlánek, který má ze všech použitých přístrojů nejvyšší vypovídající hodnotu o skutečné teplotě. Teplota byla odečítána na předním štítu motoru v intervalu dvou minut do doby, kdy se teplota dále nezvyšovala o více než 1 °C za 30 minut. Celková doba trvání měření oteplovací charakteristiky bez i se zátěží trvala 80 minut. Měření bylo také ve stejném intervalu prováděno pyrometrem na předním štítu a žebrování kostry. Odečítání teploty z pyrometru bylo zatíženo chybou, zejména špatným nastavením emisivity objektu ale také metodou měření. Naštěstí při zpracování výstupů z termokamery, kterou se fotil infračervený snímek motoru každých deset minut, bylo možno ve vyhodnocovacím programu SAT Report možno nastavit různou hodnotu emisivity. Tím bylo potvrzena správnost měření pyrometru, protože infračervené snímky byly vyhodnoceny pro nastavenou emisivitu pyrometru (0,95), ale také pro emisivitu lesklé litiny kostry motoru (0,3). Výsledky z termokamery pro obě emisivity byly téměř totožné s údaji naměřenými termočlánekem i pyrometrem.

Dále bylo pomocí známého konstrukčního uspořádání částí motoru sestaveno tepelné schéma sloužící k výpočtu tepelných sítí stroje. Předpokladem pro sestavení tohoto schématu byla úvaha odvodu ztrátového tepla z klece rotoru, třífázového vinutí statoru a ztrát v železe statorových plechů dvěma cestami. Jedna vedla ze zahříváných částí do vnitřního vzduchu, odkud se teplo dostávalo skrze přední a zadní štít motoru k chladicímu prostředí. Druhá cesta byla vedením přes plechy statoru do kostry motoru, odkud se sáláním přenášelo teplo z žebrování kostry do okolního vzduchu. První metoda výpočtu byla založena na využití znalosti vnitřních rozměrů, objemů a ploch částí stroje a druhá metoda byla založena spíše na znalosti hodnot teplo tvořících ztrát a brala v potaz i přenos tepla z rotoru přes vzduchovou mezeru do statoru stroje. Tento fakt lze krásně pozorovat v tabulce

vypočtených hodnot, kde je ochlazení rotoru a oteplení statoru jasně viditelné. Také byl proveden výpočet pomocí rovnice tepelné bilance. Tímto výpočtem jsme potvrdili měření oteplovací charakteristiky pomocí referenčního termočlánu za možnosti využití časové konstanty τ sloužící k určení množství tepla, které je motor schopný akumulovat s nulovým vyzařováním tepla do okolního prostředí.

Na konec byla provedena tepelná analýza zkoumaného stroje pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Workbench. Do tohoto programu byl vložen model vytvořený v programu Autodesk Inventor podle výkresové dokumentace daného motoru. Aby byla metoda konečných prvků zdárně simulována, je zapotřebí nejprve nastavit podmínky výpočtu. Po nastavení všech ztrát způsobujících teplo a okrajových podmínek, což byly plochy vzduchu ve vzdálenosti 1 m od všech částí stroje, byla spuštěna simulace Stady-State-Thermal pro výpočet ustáleného oteplení asynchronního motoru. Výsledky této simulace byly velice podobné hodnotám výpočtu vnitřního oteplení stroje podle obou metod. Tyto výsledky nám ale nedávají pohled na povrchovou teplotu, proto byla experimentálně zjištěna hodnota koeficientu přestupu tepla $\alpha_0 = 7,6 \text{ W/mm}^2\text{°C}$, který byl přiřazen všem plochám uvnitř motoru, které jsou reálně ofukovány ventilátorem. Výstupem simulace byla poté hodnota oteplení, která byla také reálně změřena termočlánkem. Nyní je tedy možno doporučit použít tuto konstantu pro jakékoli simulace elektrických strojů podobného výkonu.

Celkově byly splněny všechny cíle diplomové práce. Dalším pokračováním by mohla být analytická simulace oteplovací charakteristiky zahrnující ventilační chlazení motoru pro přesnější výsledky simulace v programu ANSYS Workbench. Také by měl být proveden detailnější výpočet tepelných sítí pomocí matic v prostředí Matlab.

Literatura

- [1] KREIDL, Marcel. Měření teploty : senzory a měřící obvody. Praha : BEN, 2005. 240 s.
- [2] RAČEK, J., Technická mechanika Brno 2004, Kapitola: Prostupy tepla, ISBN 80-214-2598-9
- [3] KOPYLOV, I.P. Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1988. 688 s. DT 621.313(075.8).
- [4] JANDA M.; KUCHYŇKOVÁ, H. Teplotní měření v elektrických strojích [online].Elektrorevue 2007 [vid. 2012-12-02]
- [5] PETROV, G.N. Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - Synchronní stroje. Marie Moravcová; Břetislav Benda. Praha : Československá akademie věd, 1982. 732 s.
- [6] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. 107 s. Vysoké učení technické v Brně.Skripta.
- [7] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektrotechniky: Tepelné jevy, činný výkon. Brno, 2005. 61 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta.
- [8] FUKÁTKO, Jaroslav; FUKÁTKO, Tomáš. Teplo a chlazení v elektronice 2. 1. Praha : BEN, 2006. 120 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [9] JANDA, Marcel. Teplotní optimalizace částí elektrických strojů. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10266. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Hana Kuchyňková.
- [10] Blejchař,T, Turbulence-Modelování proudění – CFX, VŠB – Technická univerzita Ostrava 2010, CZ. 1.07/2.2.00/07.0339
- [11] VLACH, Radek. Chlazení elektrických strojů – nové přístupy při řešení tepelných procesů probíhajících v elektrických strojích: Cooling of electric machines - new approaches to solve thermal processes in electrical machines: teze habilitační práce v oboru Aplikovaná mechanika. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4365-5.
- [12] ČSN EN 60034-1 ed.2 Točivé elektrické stroje – Jmenovité údaje a vlastnosti Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [13] ČSN EN 60034-2-1 Točivé elektrické stroje - Část 2-1 : Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [15] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [16] ALEKSEJEV, Aleksandr Jemel'janovič. Konstrukce elektrických strojů. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. Knižnice kovoprůmyslu (Průmyslové vydavatelství).
- [17] FUKÁTKO, Jaroslav, Jiří ŠINDELKA a Tomáš FUKÁTKO. Teplo a chlazení v elektronice. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-24-4.
- [18] Dostálek, M. Měření teplotních polí v elektrických strojích, Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 63 s.
- [19] Strmeň, M. Teplotní analýza asynchronního stroje. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, vysoké učení technické v Brně, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [20] <https://www.epristroje.cz/media/images/262748842.jpg>
- [21] <http://www.termokamera.cz/wp-content/uploads/2013/07/termokamera-testo-882.jpg>
- [22] http://pandatron.cz/elektronika3/siemens_amper2012-2_fig8.jpg
- [23] <http://motor-control-circuits.blogspot.cz/2015/04/introduction-to-three-phase-and-single.html>
- [24] <http://www.sensit.cz/en/high-accuracy-temperature-sensors.html>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií	
VUT	Vysoké učení technické v Brně	
MKP	Metoda konečných prvků	
CAD	Computer aided design	
A	Plocha	m ²
a, b, c	Empirické konstanty	-
B	Magnetická indukce	T
b _d	Šířka drážky	m
b _i	Tloušťka drážkové izolace	m
b _{ik}	Tloušťka radiálního kanálu	m
b _{vk}	Šířka radiálního kanálu	M
c	Měrná tepelná kapacita	J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
C	Elektrická kapacita	F
cos φ	Účinník	-
cos φ ₀	Účinník naprázdno	-
cos φ _k	Účinník nakrátko	-
C _t	Tepelná kapacita	J · K ⁻¹
D _e	Vnější průměr statoru	m ²
E	Termoelektrické napětí	V
e	Tolerance opracování	mm
f	Frekvence	Hz
f ₁	Kmitočet napájecího napětí	Hz
f ₂	Kmitočet rotorového napětí	Hz
f _x	Činitel drsnosti povrchu	-
h _d	Výška drážky	m
h _{j1}	Výška jha statoru	m
h _k	Výška klínové části drážky	m
I	Proud	A
I ₁₀	Proud naprázdno	A
I _{1k}	Proud nakrátko	A
I _{1s}	Statorový proud	A
I _n	Jmenovitý proud	A
K	Konstrukční konstanta uspořádání	-
l	Osová délka železa statoru	m
l ₀	Počáteční délka	m

$l_{\check{c}}$	Délka čela	m
l_{pa}	Délka paketu statoru	m
m	Hmotnost	kg
M	Moment	$N \cdot m$
n_x	Koncentrace nosičů náboje	-
n	Rychlost otáčení rotoru	min^{-1}
n_1	Synchronní otáčky	min^{-1}
Nu	Nusseltovo číslo	-
n_{vk}	Počet radiálních ventilačních kanálů	-
O_c	Obvod cívky	m
O_d	Obvod drážky	m
p	Počet pólových párů	-
p_{Φ}	Hustota tepelného toku	$W \cdot m^{-2}$
P_0	Ztráty naprázdno	W
P_1	Příkon stroje	W
P_2	Výkon stroje	W
P_k	ztráty nakrátko	W
P_{δ}	Výkon ve vzduchové mezeře	W
Q	teplo	J
Q_1	Počet drážek statoru	-
Q_e	Elektrický náboj	C
R	Elektrický odpor	Ω
R_0	Odpor při 0 °C	Ω
R_{stud}	Odpor vinutí v chladném stavu	Ω
R_{100}	Odpor při 100 °C	Ω
$R_{\check{c}}$	Tepelný odpor čel vinutí	$K \cdot W^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	-
R_{Fe}	Tepelný odpor železa statoru (rotoru)	$K \cdot W^{-1}$
R_i	Tepelný odpor drážkové izolace	$K \cdot W^{-1}$
R_t	Tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
R_v	Tepelný odpor vinutí	$K \cdot W^{-1}$
R_{vk}	Tepelný odpor v radiálních kanálech	$K \cdot W^{-1}$
R_{δ}	Tepelný odpor vzduchové mezery	$K \cdot W^{-1}$
R_{θ}	Odpor vinutí v teplém stavu	$K \cdot W^{-1}$
$R_{\theta p}$	Paralelní tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
$R_{\theta s}$	Sériový tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
s	Skluz	-
S	Povrch předávající teplo	m^2
$S1$	Trvalé zatížení	-

S2	Krátkodobý chod	-
S3	Přerušovaný chod	-
S4	Přerušované zatížení	-
S _č	Ochlazovací plocha čel vinutí	m ²
S _{ef}	Průřez vodiče	m ²
S _i	Plocha izolace	m ²
S _{paq}	Plocha povrchu paketů	m ²
S _{vk}	Plocha povrchu vinutí v kanálech	m ²
S _δ	Plocha vzduchové mezery odvádějící teplo	m ²
T	Termodynamická teplota	K
t	Čas	s
T ₁	Časová konstanta ohřevu tělesa	s
t _z	Doba zatížení	s
U	Napětí	V
U ₁₀	Napětí naprázdno	V
U _{1k}	Napětí nakrátko	V
U _i	Indukované napětí	V
U _n	Jmenovité napětí	V
U _t	Termoelektrické napětí	V
V	Objem	m ³
v	Rychlost vzduchu	m · s ⁻¹
V ₀	Počáteční objem	m ³
V _{ef}	Počet vodičů v drážce	-
W ₁₀₀	Poměr odporů při 100 °C a 0 °C	-
α	Součinitel přestupu tepla povrchem	W · mm ⁻² · °C ⁻¹
α ₀	Koeficient přestupu tepla	W · mm ⁻² · °C ⁻¹
α _f	Teplotní součinitel frekvence oscilátoru	K ⁻¹
α _o	Teplotní součinitel odporu	K ⁻¹
α _r	Délková roztažnost	K ⁻¹
β _r	Objemová roztažnost	K ⁻¹
δ	Velikost vzduchové mezery	m
Δl	Rozdíl délky	m
ΔP	Celkové ztráty	W
ΔP _d	Ventilační ztráty	W
ΔP _{Fe}	Ztráty v železe	W
ΔP _h	Ztráty hysterezní	W
ΔP _i	Ztráty dielektrické v izolaci	W
ΔP _j	Joulovy ztráty v mědi	W
ΔP _{j10}	Joulovy ztráty naprázdno	W

ΔP_{mech}	Ztráty mechanické	W
ΔP_{n1}	Činné ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{n2}	Činné ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_v	Ztráty vířivými proudy	W
ΔT	Rozdíl teplot	K
$\Delta \vartheta$	Oteplení	°C
$\Delta \vartheta_0$	Počáteční oteplení	°C
$\Delta \vartheta_{\text{max}}$	Hodnota ustáleného oteplení	°C
ε	Emisivita	-
η	Účinnost	-
ϑ	Teplota	°C
ϑ_0	Teplota vinutí v chladném stavu	°C
ϑ_F	Fahrenheitova teplota	°F
ϑ_v	Teplota okolního prostředí	°C
κ	Tepelná závislost mag. Susceptibility	-
λ	Součinitel Tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_i	Součinitel Tepelné vodivosti izolace	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ν	Kinetická vazkost vzduchu	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
σ	Konduktivita	$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
τ	Tepelná časová konstanta	s
Φ	Tepelný tok	W
Φ_a	Pohltivost	W
Φ_{dr}	Tepelný tok drážek vinutí	W
Φ_i	Tepelný tok procházející stěnami drážek	W
Φ_r	Odrazivost	W
Φ_{tr}	propustnost	W
Φ_{vk}	Tepelný tok přes radiální kanál	W
ω	Úhlová rychlost rotoru	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$